



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

**MĚŘENÍ AKUSTICKÝCH POLÍ BEZKONTAKTNÍMI
OPTICKÝMI METODAMI**

MEASUREMENT OF SOUND FIELDS USING NON-CONTACT OPTICAL METHODS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. David Karásek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Zdeněk Havránek, Ph.D.

BRNO 2019

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Kybernetika, automatizace a měření**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Bc. David Karásek

ID: 152698

Ročník: 2

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Měření akustických polí bezkontaktními optickými metodami

POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

- 1) Zpracujte literární rešerši metod vhodných pro měření akustických polí bezkontaktními optickými metodami. Podrobně rozeberte metody využívající akusto-optický jev a Radonovu transformaci a popište způsob jejich praktické realizace. Pozornost věnujte zejména požadavkům na potřebnou instrumentaci a měřitelný dynamický rozsah.
- 2) Implementujte perspektivní metody pro výpočet inverzní Radonovy transformace v prostředí LabVIEW. Ověřte jejich korektní implementaci s využitím přímé transformace na vhodném testovacím vzoru.
- 3) Definujte měřicí pracoviště pro bezkontaktní optické měření akustického pole jednoduchého zdroje zvuku s využitím dostupného hardware. Předpokládá se využití systémů pro řízení polohování a sběr signálů od firmy National Instruments a laserového vibrometru Polytec.
- 4) Sestavte měřicí pracoviště včetně mechanického manipulátoru a vytvořte počítačovou aplikaci v LabVIEW pro polohování analyzovaného zdroje zvuku a sběr a zpracování naměřených dat s využitím vytvořených funkcí pro výpočet inverzní Radonovy transformace.
- 5) Ověřte funkčnost měřicího systému a jeho parametrů při praktickém měření prostorového rozložení akustického tlaku vyzařovaného vhodnými testovacími zdroji zvuku se známou směrovou charakteristikou.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Rossel, A. T. New measurements techniques: Optical methods for characterizing sound fields. PhD thesis. Denmark Technical University. Copenhagen, Denmark. 218 s. 2014.
- [2] Kak, A. C., Slaney, M. Principles of computerized tomographic imaging. New York: IEEE Press. 327 s. 1988. ISBN 08-794-2198-3.

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 13.5.2019

Vedoucí práce: Ing. Zdeněk Havránek, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato diplomová práce si klade za cíl sestavit a prakticky ověřit funkčnost pracoviště určené pro bezkontaktní měření prostorového rozložení akustického tlaku vyzařovaného testovacími zdroji zvuku. Nejdříve je provedena rešerše optických metod, které je pro měření možné použít, následně jsou probrány teoretické základy nutné pro samotné měření a následnou rekonstrukci. Poté je zde popsán řídicí program, a nakonec jsou analyzovány vlivy, které mají na naměřená a rekonstruovaná data vliv. Vytvořené měřicí pracoviště je plně funkční, na konci práce jsou ale předešleny další možnosti pro jeho vylepšení.

Klíčová slova

CompactRIO, LabVIEW, inverzní Radonova transformace, akusto-optický jev, LDV

Abstract

The purpose of this paper is to assemble measurement chain dedicated to contactless measuring of acoustic fields emitted by test sources and to validate its results. At first author discusses possible optic methods which can be used to measure acoustic fields, then he talks about theoretical foundations which are needed to measure data and to reconstruct final data. The last two chapters are dedicated to cover basics about created program and to analyse various aspects which influence measured and reconstructed data. Created measurement chain is fully functional, at the end of this thesis are proposed some ways of improving.

Keywords

CompactRIO, LabVIEW, inverse Radon transformation, acousto-optic effect, LDV

Bibliografická citace:

KARÁSEK, David. *Měření akustických polí bezkontaktními optickými metodami*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/119322>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Zdeněk Havránek.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Měření akustických polí bezkontaktními optickými metodami jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 13. května 2019

.....
podpis autora

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce, panu Ing. Zdeňku Havránkovi, Ph.D, za veškerou metodickou a odbornou pomoc a další cenné rady, které mi při vypracování poskytoval. Také bych chtěl poděkovat své rodině za to, že mě v průběhu celého studia podpořila.

V Brně dne: 13. května 2019

.....

podpis autora

Obsah

1	Úvod	12
2	Bezkontaktní metody použitelné pro měření akustických polí.....	13
2.1	Stínografie	13
2.2	Metoda koherenční zrnitosti.....	14
2.3	Trasovací metody (Tracer methods)	16
2.4	Interferometrické metody.....	17
2.5	Vyhodnocení vhodnosti bezkontaktních metod.....	19
3	Akusto-optický jev.....	21
4	Inverzní Radonova transformace.....	25
4.1	Definice Radonovy transformace	25
4.2	Numerické metody.....	27
4.2.1	ART	27
4.2.2	SIRT	30
4.2.3	SART.....	31
4.3	Metoda filtrované zpětné projekce.....	32
4.4	Shrnutí metod	33
5	Měřicí pracoviště	35
5.1	Měřicí řetězec.....	36
5.2	Mechanický manipulátor	37
6	Software	41
6.1	Ovládání manipulátoru.....	41
6.2	Front Panel.....	42
6.3	Block Diagram.....	45
6.3.1	Nastavení parametrů měřicí karty	46
6.3.2	Polohování motorů.....	47
6.3.3	Akvizice dat	47
6.3.4	Zpracování dat	48
6.4	Čtení naměřených dat	49
7	Nepřesnosti v měření.....	51
7.1	Funkčnost algoritmu zpětné projekce.....	52
7.2	Vlivy působící na kvalitu výsledných dat	61
7.2.1	Vliv měřicích zařízení.....	62
7.2.2	Šum okolního prostředí.....	62
7.2.3	Vliv měřeného pole na odrazné zrcátko.....	67
7.2.4	Vliv změny teploty	70
7.2.5	Vliv kroku motorů.....	71

7.2.6	Vliv typu zdroje.....	75
7.2.7	Zhodnocení vlivů působících na kvalitu dat.....	81
8	Závěr.....	84
9	Použité zdroje	86
10	Příloha A – Naměřená rozložení akustických polí	89

Seznam obrázků

Obr. 2.1: Schematické rozvržení měření metodou Schlieren [2]	14
Obr. 2.2: Wollastonův hranol [3]	14
Obr. 2.3: Metoda koherenční zrnitosti- složení dvou vzorů [1]	15
Obr. 2.4: Metoda koherenční zrnitosti - použití referenčního paprsku [1]	15
Obr. 2.5: Princip laserové Dopplerovy anemometrie [9]	16
Obr. 2.6: Princip integrální laserové anemometrie [10]	17
Obr. 2.7: Záznam u metody holografické interferometrie [1]	18
Obr. 2.8: Vybavování u metody holografické interferometrie [1]	18
Obr. 2.9: Základní princip LDV [8]	19
Obr. 3.1: Graf vyjadřující nutnou úroveň akustického tlaku v závislosti na frekvenci pro dosažení požadované naměřené rychlosti [1]	24
Obr. 4.1: Shepp-Loganův fantom (vlevo) a jeho sinogram (vpravo) [17]	26
Obr. 4.2: Způsoby získání sinogramu – Paralel Beam (vlevo), Fan Beam (vpravo) [18]	26
Obr. 4.3 Princip tvorby váhové matice u metody ART [28]	28
Obr. 4.4 Schematické zobrazení průběhu hledání řešení u Kaczmarzovy metody..	29
Obr. 4.5: Schéma pro definování souřadnic Radonovy transformace [17]	32
Obr. 5.1: Schematické zobrazení návrhu měřicího řetězce	35
Obr. 5.2 Půdorys a bokorys pracoviště s vyznačenými vzdálenostmi	35
Obr. 5.3 Dekodér Polytec OFV-5000 a měřicí hlava Polytec OFV-505 [37]	37
Obr. 5.4: Translační člen Standa 8MT195 (vlevo) a inteligentní krokový motor NI ISM-7402 (vpravo) [20]	38
Obr. 5.5: CompactRIO 9068 [20]	38
Obr. 5.6: Rotační krokový motor Standa 8ME190-2 [20]	39
Obr. 5.7: Použité I/O karty – NI 9401 (vlevo), NI 9501 (uprostřed), SISU 1004 (vpravo) [20]	39
Obr. 5.8: Schéma zapojení koncových spínačů [20]	40
Obr. 6.1 Prvky nově přidané na interface	43
Obr. 6.2 Upravený stavový automat smyčky konzumenta	46
Obr. 6.3 Část ovládacího rozhraní Cteni.vi	49
Obr. 7.1 Piezoelektrický reproduktor Kemo L010 (vlevo) a deska plošných spojů s devíti reproduktory (vpravo)	51
Obr. 7.2 Originální obrazec dvou kruhů a jeho sinogram	53
Obr. 7.3 Rekonstrukce dvou kruhů pomocí zpětné projekce bez filtrů	53
Obr. 7.4 Rekonstrukce dvou kruhů pomocí filtrované zpětné projekce	53
Obr. 7.5 Řez středem originálu dvou kruhů a obou rekonstrukcí získaných pomocí filtrované zpětné projekce	54
Obr. 7.6 Originální obrazec fantoma a jeho sinogram	54

Obr. 7.7 Rekonstrukce obrazce fantoma bez aplikovaného filtru	55
Obr. 7.8 Rekonstrukce obrazce fantoma s aplikovanými filtry	55
Obr. 7.9 Řez středem originálu fantoma a obou filtrovaných zpětných projekcí.....	56
Obr. 7.10 Originální obrazec simulované akustické vlny a jeho sinogram	57
Obr. 7.11 Akustické vlny rekonstruované pomocí filtrované zpětné projekce.....	57
Obr. 7.12 Řez středem originálu akustické vlny a obou filtrovaných zpětných projekcí	58
Obr. 7.13 Sinogram naměřených dat pro $f=25$ kHz, krok translace 2 mm, krok rotace 10°	60
Obr. 7.14 Rekonstrukce obrazce pro $f=25$ kHz, krok translace 2 mm, krok rotace 10° (vlevo LabVIEW, vpravo MATLAB)	60
Obr. 7.15 Horizontální řez středem rekonstruovaných obrazců pro $f=25$ kHz, krok translace 2 mm, krok rotace 10° (modře LabVIEW, červeně MATLAB)	61
Obr. 7.16 Fourierova transformace signálu z LDV při statických podmínkách	63
Obr. 7.17 Minimální amplituda složky, která je extrahovaná	64
Obr. 7.18 Detail minimální amplitudy složky, která je extrahovaná	64
Obr. 7.19 Maximální amplituda složky, která je extrahovaná	65
Obr. 7.20 Sinogram naměřených dat pro monopól s frekvencí 20 kHz (jednotky ve V)	66
Obr. 7.21 Poměr signál-šum pro monopól s frekvencí 20 kHz (jednotky v dB)	66
Obr. 7.22 Úprava pracoviště pro zjištění míry vibrací zrcátka způsobených akustickým polem.....	67
Obr. 7.23 Sinogram hodnot naměřených při potlačení akustického pole (vlevo) a jejich poměr k šumu v dB (vpravo).....	68
Obr. 7.24 Amplitudy Fourierovy transformace pro nejnižší (vlevo) a nejvyšší (vpravo) naměřenou hodnotu.....	69
Obr. 7.25 Rekonstrukce provedená na datech naměřených při pokusu o potlačení akustické pole ve 2D i 3D grafu	69
Obr. 7.26 Měření provedené s příliš velkým krokem $f=40$ kHz, krok translace 2 mm (vlevo), 1 mm(vpravo), krok rotace 10° (vlevo), 1° (vpravo)	72
Obr. 7.27 Vliv změny kroku rotoru translace na naměřená data $f=20$ kHz, krok translace 5 mm (vlevo) a 2 mm (vpravo) a rotace 10° (vlevo) a 5° (vpravo)	73
Obr. 7.28 Vliv změny kroku rotoru translace na rekonstruovaná data $f=20$ kHz, krok translace 5 mm (vlevo) a 2 mm (vpravo) a rotace 10° (vlevo) a 5° (vpravo)	73
Obr. 7.29 Vliv změny kroku rotace na naměřená data $f=10$ kHz, krok translace 2 mm, krok rotace 10° (vlevo) a 5° (vpravo)	74
Obr. 7.30 Vliv změny kroku rotace na rekonstruovaná data $f=10$ kHz, krok translace 2 mm, krok rotace 10° (vlevo) a 5° (vpravo).....	74
Obr. 7.31 Rozdíl sinogramů pro $f=10$ kHz (vlevo) a $f=20$ kHz (vpravo)	75

Obr. 7.32 Rekonstrukce akustických tlaků pro $f=10$ kHz (vlevo) a $f=20$ kHz (vpravo)	76
Obr. 7.33 Naměřené rozložení akustické pole o frekvenci 2°kHz 120 mm nad zdrojem [1]	77
Obr. 7.34 Sinogram naměřených dat pro $f=20$ kHz, krok translace 2 mm, krok rotace 3°	78
Obr. 7.35 Rekonstrukce naměřených dat pro $f=20$ kHz, krok translace 2 mm, krok rotace 3°	78
Obr. 7.36 Hodnoty akustického tlaku dipólu pro $f=20$ kHz změřené mikrofonom G.R.A.S 46DE	79
Obr. 7.37 Rekonstrukce naměřených dat pro $f=20$ kHz, krok translace 2 mm, krok rotace 3°	79
Obr. 7.38 Sinogram naměřených dat lab. přípravku s krokem translace 1 mm a rotace 1°	80
Obr. 7.39 Rekonstruovaný obrazec lab. přípravku s krokem translace 1 mm a rotace 1°	80

1 ÚVOD

Cílem této diplomové práce je sestavit měřicí pracoviště určené pro bezkontaktní měření vibrací pomocí systémů pro řízení polohování a sběr signálů od firmy National Instruments a laserového vibrometru Polytec. Dále je požadováno vytvoření počítačové aplikace v programu LabVIEW, a nakonec ověření funkčnosti celého měřicího systému a jeho parametrů při praktickém měření prostorového rozložení akustického tlaku.

V práci je nejdříve provedena rešerše optických metod, které je pro bezkontaktní měření akustických polí možné využít. Následně je přiblížen tzv. akusto-optický jev, při kterém dochází k ovlivňování optických vlastností prostředí pomocí akustického signálu a který je ve většině případů považován za parazitní. Poté je popsána inverzní Radonova transformace, což je matematický aparát používaný pro rekonstrukci obrazů v počítačové tomografii. Další kapitola se zabývá návrhem celého měřicího řetězce a popisem použitého hardware. Předposlední kapitola popisuje program použitý pro ovládání zařízení, zpracování a analýzu naměřených dat. V poslední kapitole je provedena analýza funkčnosti vytvořeného software a jsou zde rozebrány aspekty, které naměřená data ovlivňují.

2 BEZKONTAKTNÍ METODY POUŽITELNÉ PRO MĚŘENÍ AKUSTICKÝCH POLÍ

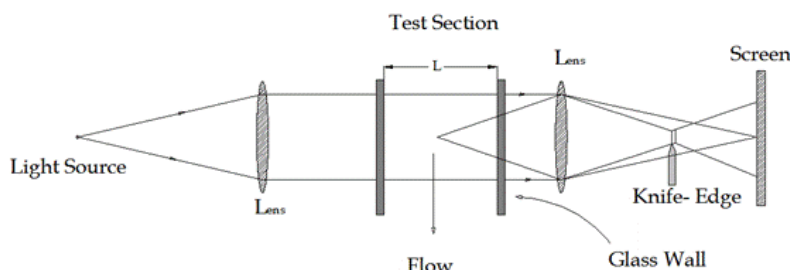
Měření zvuku má velmi dlouhou tradici, za jeho počátek lze považovat vynález telefonu v roce 1876. Mikrofony v dnešním slova smyslu však začaly vznikat až kolem roku 1920, jejich vývoj pokračuje až dodnes. Aplikace mikrofونů pro měření akustických polí je však omezená. S postupujícím vývojem se díky novým technologiím zvyšuje citlivost a zmenšují se rozměry. Problém však nastává, jestliže se vlnová délka měřeného zvukového signálu začne přibližovat velikosti mikrofону. V tomto okamžiku totiž mikrofون začne ovlivňovat měřené akustické pole. Např. mikrofон, který má velikost pouhý 1 cm, má v normálních atmosférických podmínkách limit okolo 35 kHz. Pro měření ultrazvukových akustických polí je tedy vhodnější používat bezkontaktní metody, jejichž přehledu se věnuje tato kapitola.

Zvuk lze obecně definovat jako mechanické vlnění šířící se prostředím. Základní princip klasických mikrofонů je tyto vibrace převádět na mechanickou membránu (či jiné deformovatelné těleso) a tyto deformace detekovat. Na podobném principu funguje i většina optických metod. V následujícím textu je uvedeno několik metod, které jsou určeny ke sledování vlastností (převážně toku) tekutiny či vibrační tělesa. Je tedy počítáno s tím, že akustické pole ovlivní médium (či pevné těleso, např. membránu), přičemž se tato změna stavu bude metodami detekovat.

2.1 Stínografie

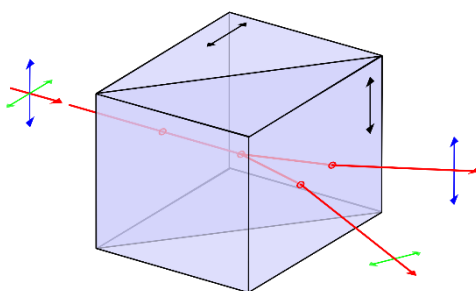
K nejstarším metodám, jaké se v optoakustických metodách používají, se řadí tzv. stínografie, která byla vyvinuta ke sledování toku tekutin. Její princip spočívá ve sledování indexu lomu v médiu. Index lomu látky je závislý na mnoha parametrech jako je vlnová délka, teplota či tlak. Základní princip spočívá v prozáření média zdrojem světla, přičemž se záření na protější straně promítne (např. na CCD senzor). Proudění v tekutině způsobuje rozdílné indexy lomu, což v médiu zapříčiní rozdílný lom paprsků. Díky tomu vzniknou na druhé straně interferenční minima a maxima, která drží informaci o pozici a rychlosti proudění. Vzhledem k vysoké závislosti indexu lomu na faktorech, které proudění neovlivňují, je tato metoda vhodná spíše pro kvalitativní než pro kvantitativní analýzy.

Další metodou používanou pro vizualizaci pohybu tekutiny je tzv. metoda Schlieren (v němčině znamená pruh). Schematické rozvržení je ukázáno na Obr. 2.1. Zdrojem světla je prosvíceno prostředí, které má být sledováno. Následně jsou paprsky pomocí čočky usměrněny na stínítko. Zároveň je do ohniskové vzdálenosti vložena čepel, která obraz částečně stíní. Při homogenitě měřeného prostředí a nulovém proudění čepel pouze snižuje jas výsledného obrazu. Při proudění média, tedy při změnách indexu lomu, nejsou do ohniska zaměřeny všechny paprsky, tím pádem jsou některé paprsky čepelí zablokovány. Tím na stínítku vzniknou místa s rozdílnou intenzitou, která opět udává pozici a rychlost proudění. Hlavní výhodou oproti stínografii je zvýšená citlivost celého aparátu. Ta se dá ještě zvýšit použitím vhodného sledovaného média, které má index lomu citlivější na změny prostředí (např. sodíková pára [1]).



Obr. 2.1: Schematické rozvržení měření metodou Schlieren [2]

Další modifikací je také tzv. Schlieren interferometr. V něm se čepel nahradí jednoduchým interferometrickým prvkem, např. Wollastonovým hranolem (Obr. 2.2). Díky tomu není paprsek ničím blokován a má vyšší intenzitu. Při nulovém proudění vygeneruje prvek interferometrický obrazec, který slouží jako reference. O charakteristice proudění vypovídají změny obrazce vzhledem k této referenci.



Obr. 2.2: Wollastonův hranol [3]

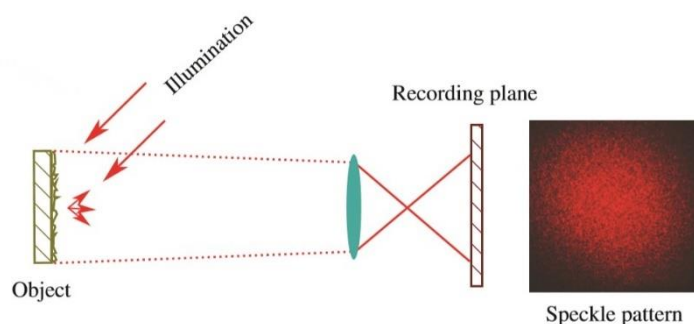
2.2 Metoda koherenční zrnitosti

Bylo vypořádováno, že při sledování laseru odraženého od povrchu vzniká na výsledném obrazci zrnění. Toto zrnění bylo určitou dobu považováno za optický šum. Bylo však zjištěno, že tyto obrazce jsou závislé na povrchu, který je laserem

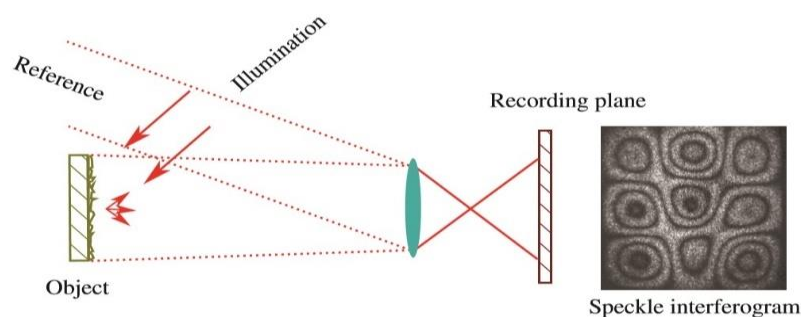
osvětlován. Jev vzniká interferencí velkého množství koherentních paprsků s různou fází, kdy k interferenci dochází v závislosti na povrchu náhodně. [4]

Předpokládejme, že je osvětlován povrch dostatečně drsný a reliéf má velikost srovnatelnou s vlnovou délkou koherentního záření. Podle Huygens-Fresnelova principu se každý bod na povrchu stane po ozáření koherentním paprskem sám zdrojem koherentního záření. Jelikož má reliéf povrchu náhodný charakter, začne docházet k interferenci. Jestliže se poté toto záření zobrazí např. na stínítko, zobrazí se vzor, který je pro určený povrch typický. Požadované informace se ze vzoru získají statistickým vyhodnocením pozice a intenzity interferenčních maxim a minim. [24]

Existuje velké množství metod, jak z diagramu určit jak makroskopické, tak mikroskopické vlastnosti. Nejjednodušším způsobem je sloučení dvou vzorů popisujících jeden objekt v různých stavech (Obr. 2.3). Metoda je jednoduchá a rychlá, poměrně přesná, a přitom nenáročná na vyhodnocení – v průmyslovém použití je tedy velmi oblíbená. Citlivost metody se dá zvýšit použitím referenčního paprsku (Obr. 2.4), kdy referenční paprsek osvětluje stínítko, na kterém se vzory zobrazují. Díky tomuto opatření lze přesněji detekovat pohyb snímaného objektu v horizontální ose. [1]



Obr. 2.3: Metoda koherenční zrnitosti- složení dvou vzorů [1]

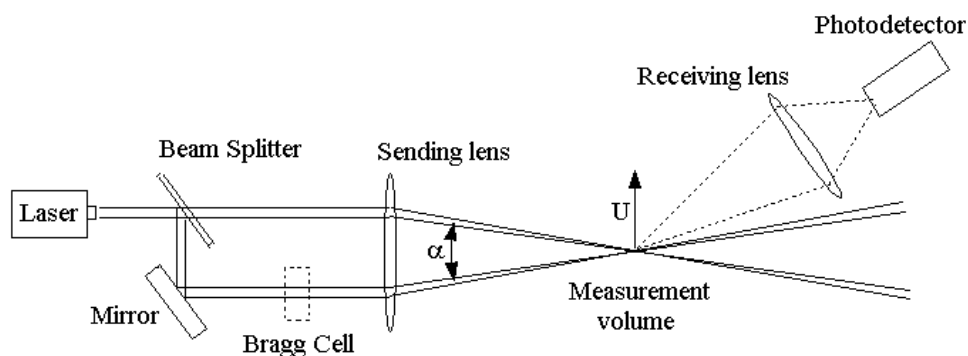


Obr. 2.4: Metoda koherenční zrnitosti - použití referenčního paprsku [1]

2.3 Trasovací metody (Tracer methods)

Další, avšak v praxi nepříliš používané metody, sledují pohyb částic, které byly do sledovaného média uměle vloženy. U této kategorie metod první nevýhoda spočívá již v samotném zavedení částic do média. Aby byla detekce co nejjednodušší, je třeba zavést větší částice, kdy by měl být jejich počet co největší. Pro co nejpřesnější měření je však naopak třeba co nejmenších částic v co nejmenším počtu, jinak by totiž ovlivňovaly vlastnosti média. Dvě pravděpodobně nejvíce prozkoumané metody jsou laserová Dopplerova anemometrie (LDA) a integrální laserová anemometrie (v anglické literatuře nazvaná Particle image velocimetry – PIV).

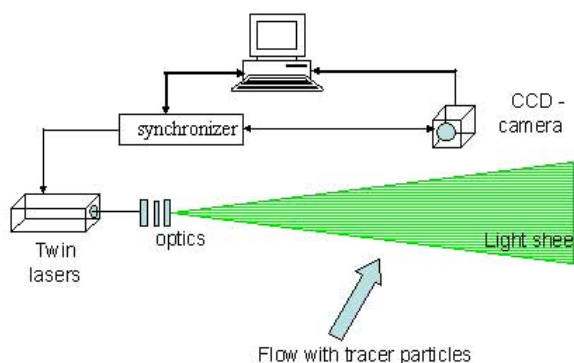
U laserové Dopplerovy anemometrie (Obr. 2.5) se měřicí řetězec skládá z laseru, u kterého je paprsek rozdělen na dvě části. Fáze jedné části se následně upraví akusto-optickým modulátorem, jinak by nebylo možné zjistit směr detekovaných částic. Paprsky jsou následně nasměrovány tak, aby se setkaly uvnitř měřeného média. V průsečíku paprsků se nachází oblast, kde jsou částice v médiu vloženy detekovány. Při průchodu částice jsou odraženy fotony, které jsou detekovány fotodetektorem. V důsledku Dopplerova jevu se v závislosti na rychlosti částice upraví vlnová délka fotonu. Přijatá data jsou následně demodulována a z posunu způsobeného jevem se zjistí rychlost částice. Jak již bylo zmíněno, její směr se zjistí pomocí fázového posunu způsobeného akusto-optickým modulátorem. Tato metoda má však poměrně velké množství nevýhod. Kvůli možným rozdílným rychlostem částic je potřeba data vyhodnocovat pomocí statistických metod. Větší nevýhoda však spočívá ve frekvenčním rozsahu detekovaného vlnění – s rostoucí frekvencí se snižuje dráha, po které se částice pohybuje, a nakonec může být tak malá, že částice zůstane pouze v oblasti křížení paprsků. [25]



Obr. 2.5: Princip laserové Dopplerovy anemometrie [9]

Metoda PIV (Obr. 2.6) oproti tomu detekuje částice na větší ploše. Médium s vloženými částicemi je plošně ozářeno laserem a plocha je snímána např. inteligentní kamerou. Snímá se tedy pozice všech částic zároveň a lze vyhodnotit směr jejich pohybu. Naměřené výsledky jsou samozřejmě silně závislé na snímkovací frekvenci kamery, počtu částic v médiu a tloušťce plochy ozářené

laserem. Přetrvávají také nevýhody LDA, kdy má metoda nižší frekvenční rozsah. Metoda je také poměrně náročná na výpočetní výkon, neboť je třeba zpracovávat velké množství dat. [10]

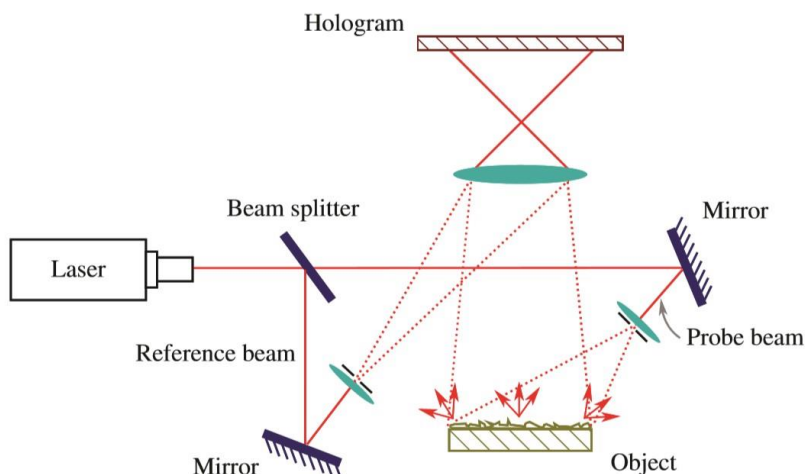


Obr. 2.6: Princip integrální laserové anemometrie [10]

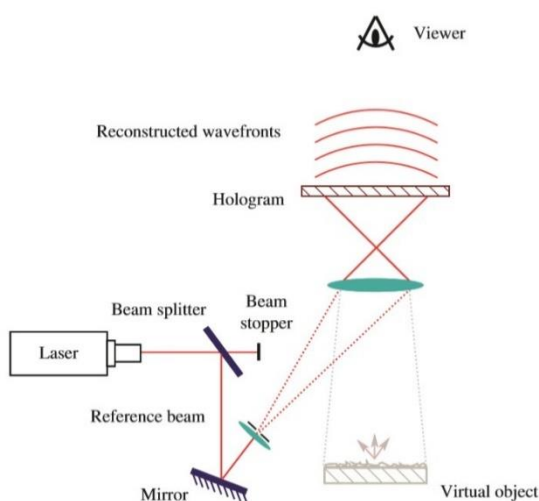
2.4 Interferometrické metody

U již zmíněných metod se využívalo jevu interference, ta však byla vyvolaná např. Wollastonovým hranolem nebo samotným sledovaným povrchem. Interferometrické metody pracují s interferencí dvou paprsků, kdy je jeden referenční a jeden je ovlivněn měřenou veličinou.

Typickým a často používaným představitelem těchto metod jsou tzv. holografické interferometry (princip zobrazen na Obr. 2.7 a Obr. 2.8). Při nich se laserovým paprskem ozáří sledovaný povrch, přičemž se tento referenční signál zaznamená. Zaznamenaná se také odraz, který od sledovaného povrchu vznikl, referenční paprsek je snímaným povrchem modulován. Výsledný záznam obsahuje jak amplitudu, tak fázi odraženého paprsku [7]. Jestliže je výsledný záznam vystaven referenčnímu signálu, lze z něj získat všechna data o chování sledovaného povrchu. Pro tuto metodu existují ještě různé modifikace – např. real-time holografie, holografie s dvojitým ozářením, se dvěma referenčními paprsky, časově průměrovaná, stroboskopická, časově modulovaná atd.[8].

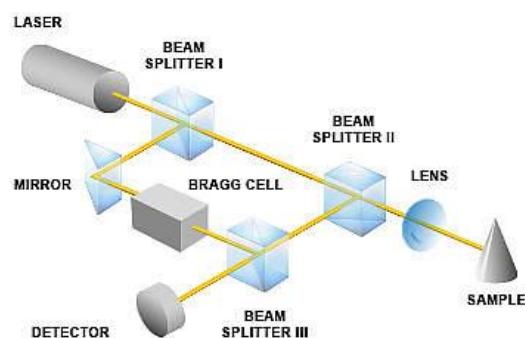


Obr. 2.7: Záznam u metody holografické interferometrie [1]



Obr. 2.8: Vybavování u metody holografické interferometrie [1]

Pro měření vibrací je v současné době velmi často používán laserový Dopplerův vibrometr (dále bude označován zkratkou LDV), jeho princip je ukázán na Obr. 2.9. Paprsek z laserového zdroje je rozdělen na dvě části, kdy jedna část pokračuje ke skenovanému povrchu, druhá slouží jako referenční. Měřicí paprsek je nasměrován na vibrující povrch, díky Dopplerově efektu se změní jeho fáze. Odražený paprsek následně interferuje s referenčním a je detekován pomocí fotodetektoru. Výsledný signál se poté demoduluje a tím se získá rychlost, s jakou se sledovaný povrch pohybuje. Aby se dal mimo rychlosti detekovat i směr pohybu, je referenční paprsek pomocí akustooptického modulátoru (např. Braggovy buňky) fázově posunut. [26]



Obr. 2.9: Základní princip LDV [8]

Lze dokázat, že frekvence demodulovaného signálu získaného detektorem se řídí vztahem (1). Tento vztah samozřejmě platí pouze pro ideální případ, tj. laser je namířen přesně kolmo na snímaný povrch a jsou odstraněny vlivy prostředí.

$$f(t) = f_s + \frac{2v(t)}{\lambda'} \quad [\text{Hz}] \quad (1)$$

kde $f(t)$ je výsledná frekvence, f_s fázový posun realizovaný akusto-optickým modulátorem, $v(t)$ rychlost pohybu snímaného povrchu a λ' vlnová délka laseru.[1]

Kromě typických výhod měření optickými metodami (zejména absence ovlivňování objektů) je LDV poměrně kompaktní, má velký dynamický rozsah a v porovnání s holografickou metodou zmíněnou v předchozím je textu velmi jednoduchý na sestavení. Už ze svého principu měří tento vibrometr rychlost pouze v jediném bodě. Na trhu se však vyskytují také modifikované varianty nazývané SLDV („Scanning Laser Doppler Vibrometer“), které pomocí nastavitelného zrcátka laserový paprsek natáčí a tím dokáží snímat i vibrace celých ploch.[26]

2.5 Vyhodnocení vhodnosti bezkontaktních metod

V předcházejících kapitolách je uvedeno několik metod, které lze k bezdotykovému měření akustických polí použít. Ani jedna z vyjmenovaných metod není pro měření akustických polí exaktně určena. Pro všechny platí, že primární účel, ke kterému jsou metody vytvořeny, zde není využit, a měří se parazitní vliv akustického pole na celé měření.

U metod stínografie, které jsou vytvořeny pro sledování toku tekutin, lze také při nulovém toku sledovat pohyb tekutiny vyvolaný samotným akustickým polem. Velká výhoda spočívá ve vysokém vlivu, jakým akustické pole na vhodné tekutiny působí, jeho vliv je v nich značně zřetelnější než v plynném prostředí. Jak je však v kapitole 2.1 uvedeno, tyto metody jsou značně náchylné k parazitním vlivům a jsou vhodné spíše pro kvantitativní než kvalitativní analýzu.

Metoda koherenční zrnitosti se používá primárně k analýze velmi malých deformací měřeného objektu či vyhodnocování drsnosti povrchu. Pro měření akustických polí lze využít vlivu akustického pole na index lomu prostředí, což by se projevilo změnou dráhy koherenčního paprsku a tím pádem i změnou výsledného vzoru. Výsledné zpracování dat by však bylo poměrně složité a celá metoda by byla velmi náchylná k parazitním vlivům na celý měřicí řetězec (např. na změnu pozice měřené plochy nebo změnu reliéfu povrchu způsobenou změnou teploty).

Metody LDA a PIV (kapitola 2.3) jsou určeny ke sledování pohybu média pomocí vložených částic. Nevýhoda těchto metod spočívá ve vyšší výpočetní náročnosti celého procesu, zejména však v omezení maximální měřitelné frekvence na přibližně 20 kHz.

Jako nejvhodnější se z uvedených metod jeví metody interferometrické. Metody uvedené v kapitole 2.4 vyhodnocují vibrace pevných povrchů. Parazitní vliv na naměřené hodnoty má však i tlak média, kterým měřicí paprsek prochází, tedy i změna tlaku způsobená akustickým polem. Metoda holografické interferometrie se kvůli složitosti měřicího aparátu jeví jako méně vhodná. Laserový Dopplerův vibrometr však tuto výhodu nemá a zároveň nemá nevýhodu LDA a PIV v nižší maximální měřitelné frekvenci.

3 AKUSTO-OPTICKÝ JEV

V kapitole 2.5 byla rozebrána vhodnost jednotlivých metod pro měření akustických polí. Metody se liší jednak primárním jevem, k jehož měření jsou určeny, ale také složitostí měřicího aparátu, vlivu parazitních veličin a složitostí zpracování naměřených dat. Jako nejvíce vhodná metoda bylo vyhodnoceno měření pomocí laserového Dopplerova vibrometru. Měřicí aparát je u ní poměrně jednoduchý a nenáročný na konstrukci a umožňuje měření zvukových polí i o vysokých frekvencích. Slouží také k měření vibrací v jednom bodě povrchu, naměřená data tedy nevyžadují složitější zpracování (např. pomocí statistických metod).

Při měření pomocí optických metod je snaha z důvodů co nejvyšší přesnosti předcházet vlivu parazitních vlastností jako jsou teplota, vlhkost nebo tlak prostředí. Tyto (a samozřejmě ještě další vlivy) totiž ovlivňují index lomu prostředí. Na druhou stranu, tyto jevy lze však i využít. V případě, kdy je hlavní měřená veličina dokonale konstantní (nebo lze její vliv odfiltrovat), lze tedy jako měřené veličiny považovat ty, které jinak bývají považovány jako parazitické.

Index lomu je samozřejmě závislý na samotném prostředí, konkrétně na jeho hustotě. Je známo, že index lomu je přímo úměrný na hustotě prostředí. Rychlost světla v prostředí je na indexu lomu nepřímo úměrná, se zvyšující se hustotou prostředí se tedy snižuje. Jelikož lze akustické vlny brát jako změny tlaku, které prostředím prostupují, lze je měřit pomocí změny rychlosti šíření světla.

V [1] je dokázáno, že index lomu se řídí vztahem

$$n \cong n_0 + \left(\frac{\partial n}{\partial p} \right)_S p \quad (2)$$

kde n_0 je index lomu prostředí za statických podmínek a p je tlak prostředí. Člen $\left(\frac{\partial n}{\partial p} \right)_S$ je označován jako piezo-optický koeficient, S zde označuje podmínku, že děj probíhá za konstantní entropie. Piezo-optický koeficient určuje závislost indexu lomu na změně tlaku pro daný případ a lze ho definovat vztahem

$$\left(\frac{\partial n}{\partial p} \right)_S = \frac{n_0 - 1}{\gamma p_0} \quad (3)$$

Zde představuje n_0 index lomu prostředí při statických podmínkách, p_0 tlak za těchto podmínek a γ Poissonovu konstantu. Po dosazení hodnot pro standardní atmosférické podmínky ($p_0 = 100 \text{ kPa}$, $n_0 = 1,000277$ a $\gamma = 1,401$) vychází koeficient přibližně $2 \cdot 10^{-9}/\text{Pa}$. Tento vztah však platí pouze v případě, že je akustický tlak mnohem menší, než tlak prostředí (tedy platí $p \ll p_0$) a kdy jsou podmínky prostředí statické. Pro metodu analyzovanou v této práci tyto podmínky platí, vztah (3) tedy lze taktéž považovat za platný. [27]

Jak již bylo zmíněno na začátku této kapitoly, pro měření rozebírané v této práci se nejvíce hodí LDV. Může být dokázáno, že fáze paprsku putujícího z hlavy senzoru na snímáný objekt se řídí vztahem

$$\phi(t) = k_0 \int_L n \, dl \quad (4)$$

kde k_0 je vlnové číslo paprsku ve vakuu a L je optická cesta, po které paprsek putuje. Jestliže se do rovnice (4) dosadí rovnice (2), vyjde vztah

$$\phi(t) = k_0 \int_L \left(n_0 + \left(\frac{\partial n}{\partial p} \right)_s p \right) dl \quad (5)$$

Tato rovnice odpovídá vztahu

$$L(t) = L_0 + l(t) \quad (6)$$

kde $L(t)$ je vzdálenost, jakou paprsek urazí, L_0 skutečná vzdálenost mezi hlavicí senzoru a měřeným povrchem a $l(t)$ vychýlení měřeného povrchu. Po úpravě rovnice (5) lze dostat

$$\phi(t) = k_0 n_0 \left(\int_L dl + \frac{1}{n_0} \left(\frac{\partial n}{\partial p} \right)_s \int_L p \, dl \right) \quad (7)$$

Tato rovnice obsahuje informace o akusto-optickém efektu. Rychlost pohybu naměřená pomocí LDV může být vyjádřena pomocí vztahu

$$v_{LDV}(t) = \frac{1}{k_0 n_0} \frac{d\phi(t)}{dt} \quad (8)$$

Po dosazení vztahu (7) vychází

$$v_{LDV}(t) = \frac{dL(t)}{dt} + \frac{1}{n_0} \left(\frac{\partial n}{\partial p} \right)_s \frac{d}{dt} \left(\int_L p \, dl \right) \quad (9)$$

Jestliže se do tohoto vztahu následně dosadí (6), vyjde

$$v_{LDV}(t) = \frac{dl(t)}{dt} + \frac{1}{n_0} \left(\frac{\partial n}{\partial p} \right)_s \frac{d}{dt} \left(\int_L p \, dl \right) \quad (10)$$

Tato rovnice se dá pomocí substituce zjednodušit do přehlednějšího tvaru

$$v_{LDV}(t) = v_m(t) + v_{ao}(t) \quad (11)$$

Ten vyjadřuje skutečnost, že celková rychlost pohybu naměřená vibrometrem [$v_{LDV}(t)$] je určena součtem rychlosti pohybu měřeného objektu [$v_m(t)$] a rychlosti způsobenou akusto-optickým efektem [$v_{ao}(t)$]. Jestliže tedy vezmeme v potaz případ, kdy je měřený objekt vzhledem k senzoru v klidu (tedy $v_m(t) = 0$), vychází, že naměřená rychlost je závislá pouze na akusto-optickém efektu, tedy

$$v_{LDV}(t) = v_{ao}(t) = \frac{1}{n_0} \left(\frac{\partial n}{\partial p} \right)_s \frac{d}{dt} \left(\int_L p \, dl \right) \quad (12)$$

V případě, že jsou v průběhu měření podmínky konstantní (tedy teplota, vlnová délka paprsku atd.), lze členy n_0 a $(\partial n / \partial p)_s$ taktéž považovat za konstanty. Ze vztahu (12) v tomto případě vyplývá, že vibrometr měří na optické cestě

laserového paprsku integrál tlaku, který je vynásoben konstantními hodnotami určenými vlastnostmi měřicího prostředí.

Je tedy dokázáno, že akustický tlak lze pomocí LDV změřit. Co však dosud nebylo zmíněno je nutná úroveň velikosti akustického tlaku, aby byl akusto-optický jev pozorovatelný. Mějme zjednodušený případ, kdy je zvukové vlnění paralelně na měřicí paprsek a měření probíhá za ideálních podmínek, kdy nedochází k interakci mezi zvukovými vlnami a měřícím aparátem. V tomto idealizovaném případě je tedy akustická vlna charakterizována vztahem

$$p = A \sin(\omega t + \varphi_0) \quad (13)$$

kde A je amplituda, ω úhlová rychlost a φ_0 počáteční fáze vlnění. Po dosazení do vztahu (12) tedy vychází

$$v_{ao}(t) = \frac{1}{n_0} \left(\frac{\partial n}{\partial p} \right)_s \frac{d}{dt} \left(\int_0^{L_0} A \sin(\omega t + \varphi_0) dl \right) \quad (14)$$

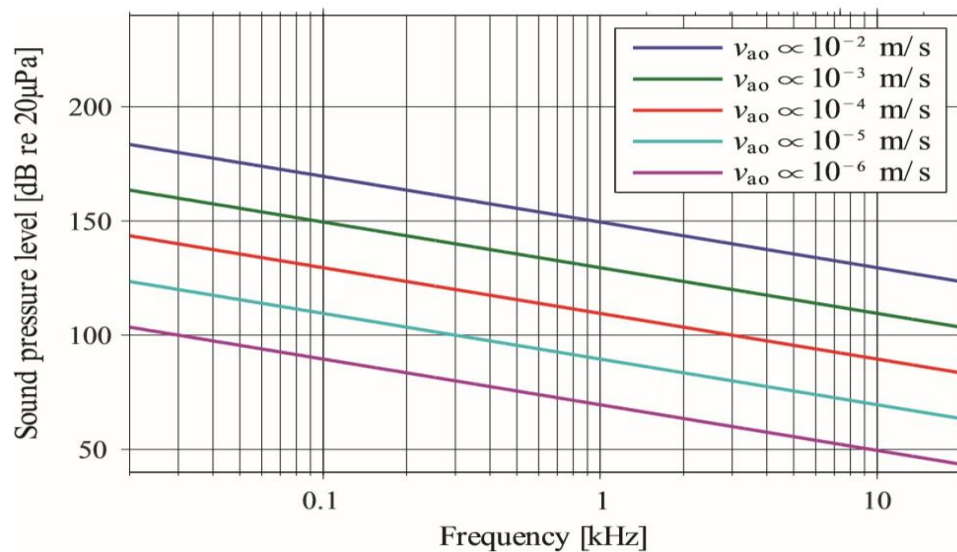
Po integraci platí

$$v_{ao}(t) = -\frac{L_0}{n_0} \left(\frac{\partial n}{\partial p} \right)_s A \omega \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (15)$$

Pro výpočet efektivní hodnoty naměřené rychlosti lze vztah ještě dále upravit

$$v_{ao,rms} = \frac{\omega L_0}{n_0} \left(\frac{\partial n}{\partial p} \right)_s \frac{A}{\sqrt{2}} = \frac{\omega L_0}{n_0} \left(\frac{\partial n}{\partial p} \right)_s p_{rms} \quad (16)$$

Na Obr. 3.1 je zobrazena nutná úroveň akustického tlaku v závislosti na frekvenci pro případy, aby ji LVD detekoval jako pohyb o rychlosti uvedené v legendě. Hodnoty byly vypočítány dosazením do vztahu (16), přičemž byly použity hodnoty pro standardní atmosférické podmínky a délka měřicího paprsku byla zvolena 1 m. Hladina zvuku je zde zobrazena v decibelech, kdy je vztažena k tzv. prahu slyšitelnosti $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} Pa$. Z Obr. 3.1 je vidět hned několik skutečností. Akusto-optický jev není v atmosférických podmínkách příliš zřetelný, aby se na LDV naměřila rychlost $10^{-2} m/s$, musí být hladina zvuku na frekvenci 1 kHz rovna hodnotě 150 dB. S rostoucí frekvencí však nutná hladina klesá, na jednu dekádu přibližně o 25 dB. Zároveň je ze vztahu (16) vidět, že se citlivost pro rostoucí vzdálenost mezi hlavicí senzoru a odraznou plochou (označeno L_0) zvyšuje. Z uvedených faktů tedy vychází, že citlivost měření roste se zvyšující se frekvencí zvuku a s optickou vzdáleností L_0 . [1]



Obr. 3.1: Graf vyjadřující nutnou úroveň akustického tlaku v závislosti na frekvenci pro dosažení požadované naměřené rychlosti [1]

Citlivost měření je však stále poměrně nízká, přitom se zatím počítalo pouze s ideálními podmínkami. Při skutečném měření získávají vliv ještě další faktory jako nepřesnosti samotného LDV a chyba A/D převodníku. Velký vliv také má vliv zvukového vlnění na mechanické součásti měřicího aparátu, akustické vlny mohou např. způsobovat vibrace odrazné plochy. Kvůli tomu je nutné počítat se skutečností, že při reálném měření musí být akustický tlak oproti teoretickým hodnotám vyšší.

4 INVERZNÍ RADONOVA TRANSFORMACE

V kapitole 3 bylo dokázáno, že zvukové vlnění lze změřit pomocí laserového Dopplerova interferometru. Jak ale také bylo uvedeno, tento přístroj měří rychlost vibrací pouze v jednom bodě, případně změny akustického tlaku integruje pouze na dráze paprsku. Pro změření charakteristiky akustického pole je však potřeba provést měření na určité ploše. Pro toto měření však lze výhodně použít princip, který se využívá i např. v lékařství v tomografii.

4.1 Definice Radonovy transformace

CT neboli výpočetní (občas nepřesně označovaná jako počítačová) tomografie, je metoda, pomocí které lze neinvazivně zobrazit vnitřní orgány. Orgány jsou při této metodě postupně v různých úhlech prozařovány rentgenovým paprskem, přičemž se měří útlum intenzity tohoto paprsku. Z naměřených dat se poté pomocí tzv. inverzní Radonovy transformace složí výsledný obraz. Tato metoda je tedy velmi podobná metodě použité při měření akustických polí, akustické pole je totiž postupně prozařováno laserovým paprskem a je měřena změna jeho rychlosti.

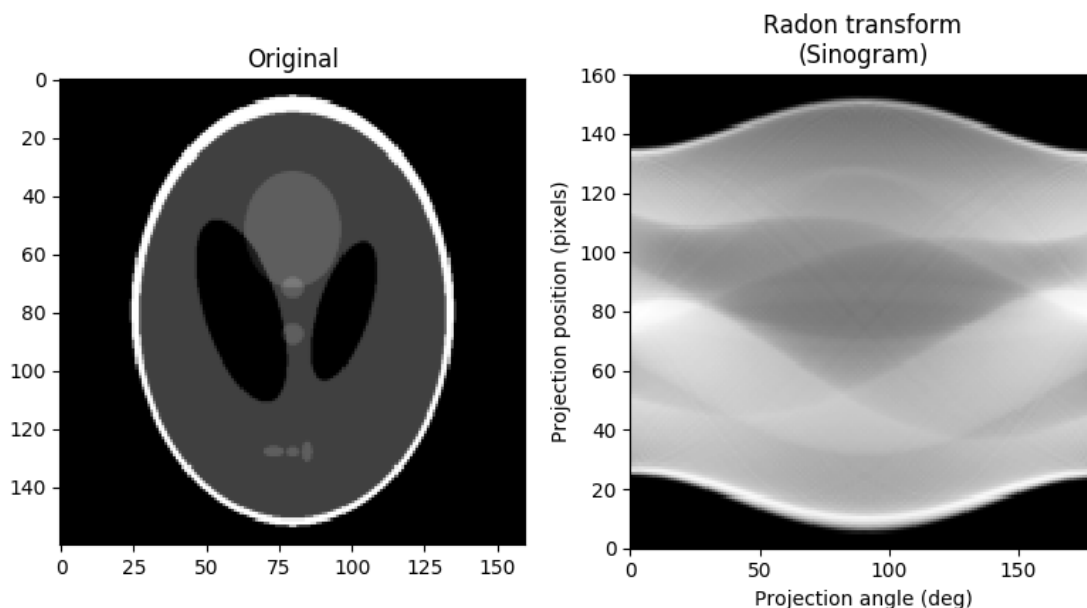
Obecná definice Radonovy transformace je v [16] uvedena jako:

„Nechť $f(x,y)$ je spojitá funkce definovaná na \mathbb{R}^2 a \vec{r} je směrový vektor bodu o souřadnicích (x,y) . Jestliže existuje $\hat{f}(s, \phi)$ pro všechny dvojice (s, ϕ) , potom

$$\hat{f}(s, \phi) = \int_{-\infty}^{\infty} f(r) dz \quad (17)$$

je Radonova transformace funkce $f(x, y)$.“

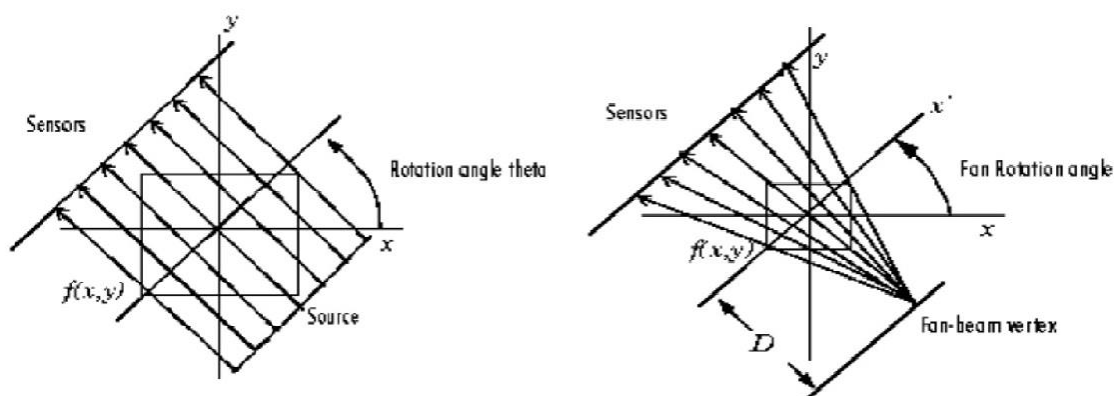
Výstup Radonovy transformace je tedy hodnota integrálu přímky, která je závislá na pozici daného bodu této přímky a na úhlu ϕ , tato matice hodnot se nazývá sinogram. Na Obr. 4.1 je zobrazen tzv. Shepp-Loganův fantom a jeho sinogram. Fantom byl vytvořen jako jednoduchý model hlavy, který se skládá z deseti různých elips.



Obr. 4.1: Shepp-Loganův fantom (vlevo) a jeho sinogram (vpravo) [17]

Pro získání sinogramu existují dva hlavní způsoby, tzv. Paralel Beam a Fan Beam (viz Obr. 4.2). U verze Paralel se postupně natáčí jak senzor, tak zrcátko, u Fan se posouvá pouze zrcátko a senzor ho postupně sleduje. V našem případě bude prováděno měření Paralel, neboť je jednodušší na implementaci a jeho výsledky nejsou závislé na vzdálenosti skenovaného objektu od hlavičky senzoru.

Budeme-li tedy provádět měření akustického pole pomocí LDV tak, že změříme integrál tlaku na optické dráze laseru v závislosti na posunutí a úhlu natočení, jako výstup dostaneme sinogram akustického pole.



Obr. 4.2: Způsoby získání sinogramu – Paralel Beam (vlevo), Fan Beam (vpravo) [18]

Aby tedy bylo možné získat z naměřených dat výsledný tvar akustického pole, je třeba provést inverzní Radonovu transformaci, tedy akci, která získá ze sinogramu původní obrazec. Pro inverzní transformaci existuje několik různých

postupů, které se liší svojí výpočetní náročností a přesností. Tyto postupy lze rozdělit na dvě základní skupiny, numerické metody a metodu zpětné projekce.

4.2 Numerické metody

Vývoj numerických metod probíhá již prakticky od vynálezu tomografie, přičemž jsou snahy o vyvinutí metody, která je výpočetně nenáročná a zároveň vždy dodá správný výsledek – cíl, kterého zatím nebylo dosaženo. Vzhledem k velkému množství metod, které byly doposud vyvinuty, budou v následujícím textu popsány pouze tři základní. Ve většině případů totiž ostatní metody pouze rozšiřují tyto základní, kdy jsou přidávány nástroje, které zvyšují přesnost nebo snižují výpočetní náročnost.

4.2.1 ART

Metoda ART je první a na princip nejjednodušší algebraická metoda, která byla pro zpětnou Radonovu transformaci vyvinuta. Název metody je zkratka z anglického výrazu „Algebraic Reconstruction Technique“. Tato metoda je založena na řešení lineární soustavy rovnic vyjádřených maticovým zápisem

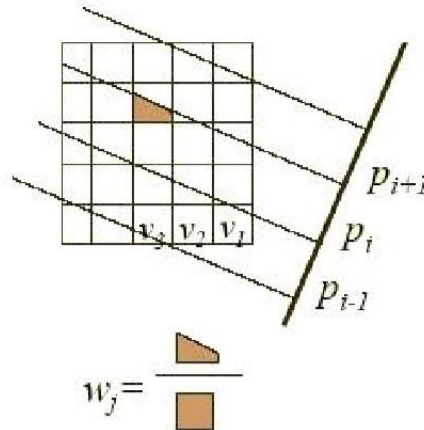
$$\mathbf{A}\vec{x} = \vec{b} \quad (18)$$

, kde tento zápis představuje soustavu rovnic

$$\begin{aligned} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{13}x_3 + \dots + a_{1N}x_N &= b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{23}x_3 + \dots + a_{2N}x_N &= b_2 \\ a_{31}x_1 + a_{32}x_2 + a_{33}x_3 + \dots + a_{3N}x_N &= b_3 \\ &\dots \\ a_{M1}x_1 + a_{M2}x_2 + a_{M3}x_3 + \dots + a_{MN}x_N &= b_M \end{aligned} \quad (19)$$

Sloupcový vektor \vec{b} zde představuje hodnotu integrálu laserového paprsku pro všechny úhly (tedy jeden sloupec hodnot ze sinogramu). Sloupcový vektor \vec{x} označuje hledané hodnoty a matice \mathbf{A} je tzv. váhová matice. Ta obsahuje hodnoty vah neboli míru, jakou byl daný bod skenovaného objektu integrován – vizualizovaný princip tvorby váhové matice je zobrazen na Obr. 4.3.

Postup u této metody je tedy následující. Nejdříve se vytvoří matice, která má rozměry výsledku – v případě rekonstrukce do obrazce 128 pixelů krát 128 pixelů má tato matice rozměry 128x128. Z ní se následně vytvoří váhová matice, kdy se pro daný úhel skenování vytvoří matice hodnot \mathbf{A} , která vypovídá o tom, jakými (a s jakou mírou) pixely výsledného obrazce prochází paprsek laseru. Nakonec se vytvoří matice \vec{b} , do které se ze změřeného sinogramu zkopírují hodnoty úhlů pro daný úhel skenovacího paprsku.



Obr. 4.3 Princip tvorby váhové matice u metody ART [28]

Následně se vyřeší soustava lineárních rovnic zadaných těmito maticemi. Soustava rovnic vlastně řeší problém, který lze formulovat větou: „Jaké jsou hodnoty ve zvoleném sloupci výsledného obrazce, aby byly získány hodnoty vektoru hodnot pro zvolenou pozici v sinogramu?“.

V řešení takovéto soustavy lineárních rovnic však vzniká zásadní problém, soustava totiž není řešitelná klasickými metodami. Matice A totiž již pro malé výsledné obrazce nabývá obrovských rozměrů (pro velikost 256x256 má matice rozměry přibližně 65 000x65 000 [15]), k matici tedy nelze vytvořit inverzi. Také se kvůli tomu objevují problémy s počítačovou pamětí. Matice je naštěstí velmi řídká, pro její uchování lze tedy použít speciálních datových typů.

U metody ART se tedy pro řešení rovnic používá tzv. Kaczmarzův algoritmus (v některých zdrojích označovaný jako Kaczmarzova metoda). Tato iterativní metoda funguje na poměrně jednoduchém principu – do prostoru řešení jsou promítnuty roviny zadané v předpisu rovnice. Je proveden původní odhad měření a následně se v jednotlivých iteracích tento odhad neustále upřesňuje, bod se neustále pohybuje směrem k průsečíku rovin. Algoritmus je ukončen ve chvíli, kdy je posun hodnoty menší než předem zadaná hodnota, nebo kdy počet iterací zadanou hodnotu překročil. Postup algoritmu je tedy následující [29]:

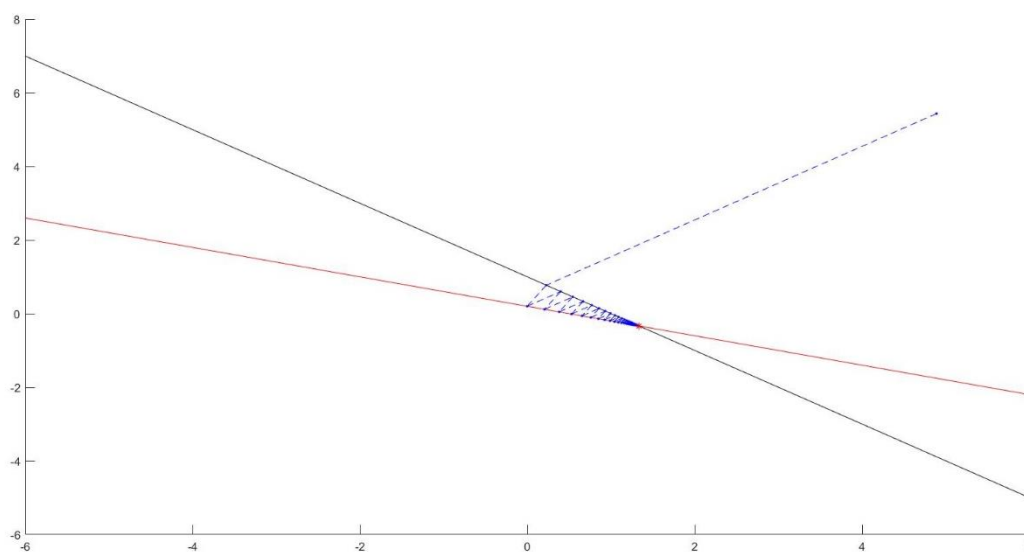
1. Proveden počáteční odhad výsledného řešení
2. Řešení upraveno podle vztahu

$$x^{k+1} = x^k + \frac{\alpha_k (b_{i(k)} - \langle a_{i(k)}, x^k \rangle)}{\|a_{i(k)}\|^2} a_{i(k)}, k \geq 0 \quad (20)$$

a platí, že $i(k) = (k \bmod m) + 1$

3. Pokud je splněno některé kritérium (překročen limit iterací, dosaženo požadované přesnosti atd.), platí, že $x_k \cong x = A^{-1}b$, jinak opakuj bod 2.

Schematický průběh metody je ukázán na Obr. 4.4. Ten je získán pomocí skriptu vytvořeného v programu Matlab a zobrazuje řešení velmi jednoduché rovnice $A\bar{x} = \bar{b}$, kde $A = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 2 & 5 \end{pmatrix}$ a $\bar{b} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$. Modrá čára zde zobrazuje změny výsledného řešení. Jako kritéria ukončení zde bylo zvoleno překročení hodnoty 1000 iterací, případně změna výsledné hodnoty, která není větší, než $1 * 10^{-3}$. Výsledné řešení rovnice je vektor hodnot $\bar{x} = \begin{pmatrix} 1,333 \\ -0,333 \end{pmatrix}$, metoda našla řešení $\bar{x} = \begin{pmatrix} 1,332 \\ -0,333 \end{pmatrix}$, přičemž než bylo dosaženo požadované přesnosti, proběhlo 92 iterací [30].



Obr. 4.4 Schematické zobrazení průběhu hledání řešení u Kaczmarzovy metody

Zpětná rekonstrukce ART má tedy následující průběh:

1. Vytvoření matice A pro specifickou pozici skenovacího paprsku a matice \bar{b} ze sinogramu
2. Výpočet vektoru \bar{x} pomocí Kaczmarzovy metody
3. Pokud není pozice skenovacího paprsku poslední, posuň se na další pozici a začni znovu od bodu 1.

Jak již však bylo řečeno, problém nastává u řešení soustavy lineárních rovnic pomocí Kaczmarzovy metody. Na Obr. 4.4 je zobrazeno řešení soustavy, která má matici A o rozměru 2×2 . Přitom pro nalezení řešení o přesnosti na tři desetinná místa musí proběhnout 92 iterací, řešení bylo nalezeno za cca 0,1 s. Matice A má však u metody ART již pro obrazec 256×256 velikost $65\,000 \times 65\,000$. Metoda je tedy výpočetně a časově velmi náročná a v praxi se tedy příliš nepoužívá. Pro zlepšení výpočetní náročnosti se např. používá modifikace Kaczmarzovy metody, která se nazývá „Randomized Kaczmarz Method“. U ní nejsou řádky z matice A voleny

postupně, ale jsou voleny náhodně s určitou pravděpodobností. Díky tomu je obecně snížen počet cyklů nutných k nalezení řešení. [28]

Ovšem největší nevýhoda metody spočívá v její vysoké citlivosti na nekvalitní vstup. Hodnoty výsledku jsou aktualizovány postupně a jsou silně závislé na tom, aby byla měření bodů v prostoru co nejvíce kvalitní – tzn. aby při skenování stejného bodu z různých úhlů vycházela pro tento bod ve vypočteném výsledku stejná hodnota. Tato podmínka je však obecně poměrně obtížně dodržitelná, neboť se při tomografii operuje s poměrně malými hodnotami a měření je citlivé na rušení. Kvůli tomu se u metody ART vyskytují ve výsledném obrazci fragmenty, častý je také šum typu „Salt and Pepper“.

4.2.2 SIRT

Nevýhodu citlivosti na šum vysvětlené v posledním odstavci kapitoly 4.2.1 odstraňuje metoda nazvaná SIRT – Simultaneous Iterative Reconstruction Technique.[28] U ní opět probíhá řešení lineární rovnice $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$. Hodnoty výsledku však nejsou aktualizovány okamžitě, jako u ART, nýbrž je výsledná hodnota pixelu určena ze všech změn v průběhu celého algoritmu, díky čemuž je vliv šumu ve vstupních datech téměř eliminován taktéž se nevyskytuje šum „Salt and Pepper“, který je ve velké míře přítomný u metody ART.

Postup celého algoritmu je následující [31]:

1. Je inicializována matice výsledků \mathbf{x} a vytvořena matice \mathbf{A} (stejná, jako u ART)
2. Hodnota výsledné matice je aktualizována pomocí vztahu

$$\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{x}^k + \mathbf{CA}^T \mathbf{R}(\mathbf{b} - \mathbf{Ax}^k) \quad (21)$$

3. Bod 2. je zopakován pro všechny prvky matice \mathbf{x}
4. Pokud není splněno kritérium ukončení, opakuj od bodu 2

Diagonální matice \mathbf{C} a \mathbf{R} ve vztahu (21) zajišťují průměrování hodnot. Matice \mathbf{C} na své diagonále obsahuje hodnoty, které kompenzují počet paprsků, které projdou pixelem, matice \mathbf{R} hodnoty, které kompenzují počet pixelů, kterými paprsek projde. Matice lze také vyjádřit pomocí vztahů

$$c_{jj} = \frac{1}{\sum_i a_{ij}}; r_{ii} = \frac{1}{\sum_j a_{ij}} \quad (22)$$

Metoda však není v praxi téměř používána. Díky průměrování eliminuje fragmenty výsledného obrazce, velkou překážkou v implementaci je ale rychlost její konvergence. Kaczmarzův algoritmus u metody ART pracuje se střední kvadratickou odchylkou, která způsobuje dosažení výsledku za mnohem kratší dobu.

4.2.3 SART

Dosud přiblížené iterativní metody ART a SIRT mají své zřejmé výhody, kvůli vysoké přítomnosti šumu u metody ART a velmi vysoké výpočetní náročnosti u metody SIRT není ani jedna v praxi příliš používána. Pro eliminaci těchto nevýhod byl vyvinut tzv. SART (Simultaneous Algebraic Reconstruction Technique) kombinující rychlost ART a přesnost SIRT. [32]

Konkrétněji řečeno tato metoda opět používá průměrnou hodnotu změn vypočítaných v průběhu celého algoritmu, její vztah pro aktualizaci hodnot však zaručuje rychlejší konvergenci k výsledkům. Základní matice jsou stejné jako u již přiblížených metod. Nejdříve tedy proběhne inicializace matice výsledků \mathbf{x} a vygenerování matice \mathbf{A} o rozměrech $M * N$ pomocí dopředné projekce, následující kroky se však liší. Jsou zdefinovány matice

$$\mathbf{A}_{i,+} = \sum_{j=1}^N \mathbf{A}_{ij} \text{ pro } i = 1, \dots, M \quad (23)$$

$$\mathbf{A}_{+,j} = \sum_{i=1}^M \mathbf{A}_{ij} \text{ pro } j = 1, \dots, N \quad (24)$$

a

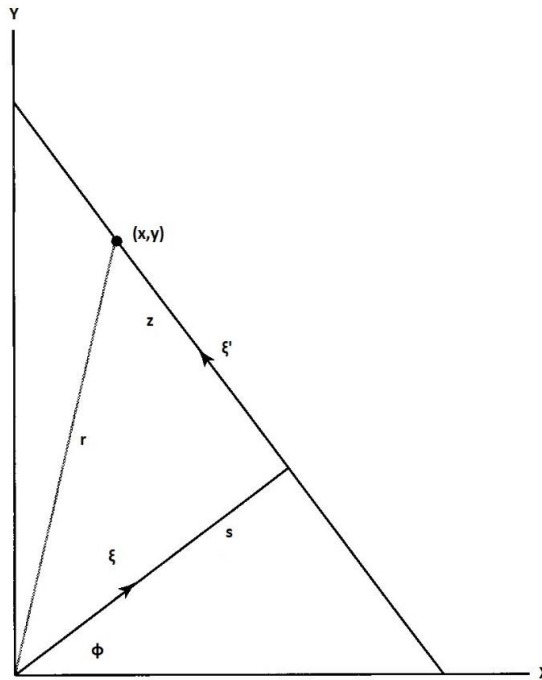
$$\bar{\mathbf{b}}(\mathbf{x}) = \mathbf{A}\mathbf{x}$$

Matice $\mathbf{A}_{i,+}$ a $\mathbf{A}_{+,j}$ zde, stejně jako \mathbf{C} a \mathbf{R} u SIRT, slouží k průměrování hodnot pixelu ze všech hodnot vypočítaných v průběhu algoritmu. Samotná aktualizace výsledné matice \mathbf{x} je řízena vztahem

$$x_j^{k+1} = x_j^k + \frac{1}{\mathbf{A}_{+,j}} * \sum_{i=1}^M \frac{\mathbf{A}_{i,j}}{\mathbf{A}_{i,+}} (b_i - \bar{b}_i(\mathbf{x}^k)) \quad (25)$$

4.3 Metoda filtrované zpětné projekce

Mějme jeden bod v kartézské soustavě definovaný souřadnicemi (x, y) .



Obr. 4.5: Schéma pro definování souřadnic Radonovy transformace [17]

Radonova transformace převádí souřadnice x a y na vzdálenost s a úhel ϕ , z Obr. 4.5 lze tedy jednoduše odvodit, že platí

$$x = s \cos \phi - z \sin \phi \quad (26)$$

a

$$y = s \sin \phi + z \cos \phi \quad (27)$$

Jestliže se z rovnice (26) vyjádří z , vyjde

$$z = \frac{-x + s \cos \phi}{\sin \phi} \quad (28)$$

Když se tento vztah následně dosadí do (27), vyjde

$$y = \frac{\cos \phi}{\sin \phi} (-x + s \cos \phi) + s \sin \phi \quad (29)$$

Po úpravě této rovnice lze následně napsat, že

$$s = x \cos \phi + y \sin \phi \quad (30)$$

Základní vztah pro Radonovu transformaci je uveden v rovnici (17), inverze této rovnice je

$$g(x, y) = \int_0^\pi \hat{f}(s, \phi) d\phi \quad (31)$$

kde $\hat{f}(s, \phi)$ je Radonova transformace (tedy výstup z měření) a $g(x, y)$ původní obrazec získaný z transformace. Jak je z rovnice (31) zřejmé, inverzní transformace probíhá pouze v rozsahu $\phi \in \langle 0; \pi \rangle$. Radonova transformace je totiž symetrická

podle osy, výsledky pro rozsah $\phi \in \langle \pi; 2\pi \rangle$ by byly totožné a pouze by zvyšovaly množství nutných výpočtů. Jestliže se do rovnice (31) dosadí vztah (30), dostaneme

$$g(x, y) = \int_0^\pi \hat{f}(x \cos \phi + y \sin \phi, \phi) d\phi \quad (32)$$

Tento vztah je však určen pro spojitou transformaci, která není v drtivé většině případů k dispozici. Pro diskrétní data byl vztah upraven na

$$g(x, y) = \frac{\pi}{N} \sum_{i=1}^n \hat{f}(x \cos \phi_i + y \sin \phi_i, \phi_i) \quad (33)$$

kde N značí celkový počet získaných dat (tedy počet kroků natočení vynásobený počtem kroků translace). Výsledná velikost rekonstruovaného obrazu se řídí vztahem

$$x = 2 * \left\lceil \frac{N}{2 * \sqrt{2}} \right\rceil_f \quad (34)$$

Kde x je výsledný počet pixelů v jednom směru (obrazec má tedy rozměr $x * x$ pixelů), N je celkový počet kroků translace a dolní index f zde značí zaokrouhlení směrem dolů.

Jak bylo uvedeno, numerické metody jsou přesnější, jsou však výpočetně náročné, a ne vždy však konvergují ke správnému výsledku. Metoda zpětné projekce je naopak výpočetně mnohem rychlejší (v [1] je uvedeno, že až stonásobně), její přesnost je však nižší. Jestliže by se algoritmus řídil podle vztahu (32), výsledný obrazec by byl totožný s originálním. Tento algoritmus však počítá s nekonečným množstvím spojitých dat. U diskrétních dat se se snižujícím se počtem vzorků zvyšuje šum a tím pádem neostrost obrazu a snižuje se jeho kontrast. Také vzniká tzv. hvězdovitý efekt, který vzniká díky superpozici paprsků, pomocí kterých bylo prováděno skenování.

Tyto chyby, zejména neostré obrazce s nízkým kontrastem, lze odstranit vhodným filtrováním, tato úprava byla nazvána metoda Filtrované zpětné projekce – FBP. Na naměřená data se pro jednotlivé hodnoty ϕ aplikují ve frekvenční oblasti filtry, následně se provede zpětná transformace pomocí vztahu (33). Nejčastěji se aplikuje nejdříve jednoduchý filtr typu rampa (předpis $y = |x|$ pro frekvenční oblast), následně některý z filtrů typu dolní propust' (např. Hannovo okno).[33]

4.4 Shrnutí metod

Jak je v kapitole 4 uvedeno, metody rekonstrukce z tzv. sinogramu lze rozdělit na dva základní typy, které se liší svou přesností a výpočetní náročností – numerické iterativní metody a metodu zpětné projekce.

Numerické iterativní metody fungují na základním principu řešení soustavy lineárních rovnic $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$, kde \mathbf{b} je naměřený sinogram, \mathbf{A} matice vytvářející dopřednou projekci a \mathbf{x} hledaný výsledný obrazec. Vzhledem k velikosti matic však není možné soustavu převést na $\mathbf{x} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{b}$ a je nutné používat pro řešení iterativní algoritmy. Metoda ART se vyznačuje rychlejší konvergencí ke správnému výsledku, avšak její výsledek je silně citlivý na šum. Tuto vlastnost potlačuje metoda SIRT, ta se ale vyznačuje velmi vysokou výpočetní náročností a pomalou konvergencí. Výhody obou metod spojuje SART, která potřebuje menší počet iterací než SIRT a zároveň na rozdíl od ART potlačuje šum v datech.

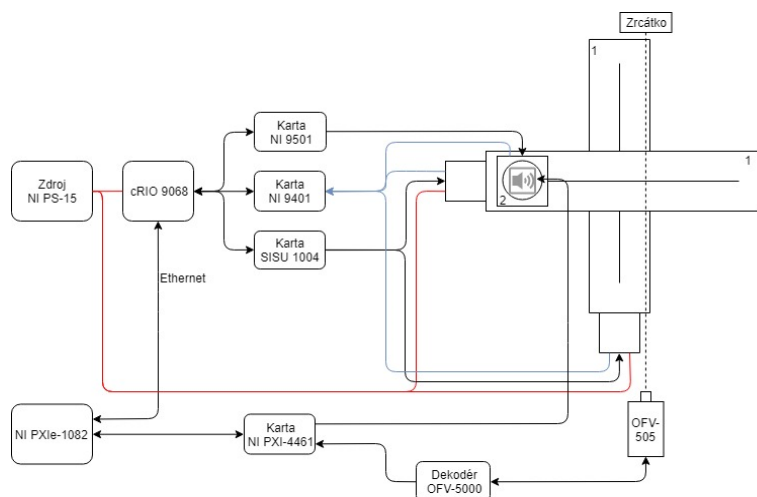
Tyto zmíněné metody jsou pouze základními verzemi a neustále vznikají jejich modifikace, které se snaží co nejvíce snížit výpočetní čas a zároveň zachovat vysokou přesnost.

Metoda filtrované zpětné projekce je v praxi nejpoužívanější. Zpětná projekce spočívá pouze v aplikování vzorce, který způsobí geometrickou transformaci ze sinogramu na originální obraz a vzniknul inverzí vztahu, který Radonovu transformaci definuje. Výsledný obrazec mívá ale nezřetelné kontury a pro kvalitní výsledek je u něj nutné provádět ještě další zpracování. Před samotným algoritmem se tedy na sinogram ještě aplikuje filtr typu rampa a následně pro potlačení rušení ještě filtr typu dolní propust', např. Hannovo okno.

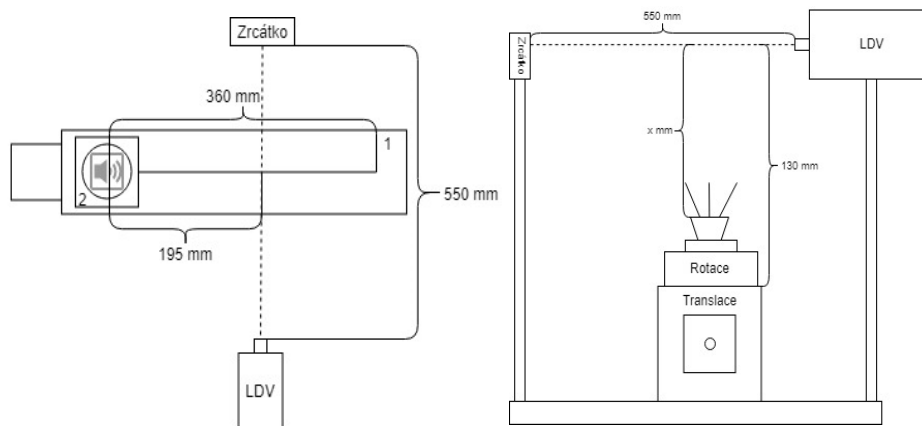
Jestliže se tedy porovnají numerické metody s filtrovanou zpětnou projekcí, lze dojít k několika závěrům. Numerické metody dokáží i bez aplikace následného zpracování obrazu dávat ostřejší a lepší výsledky než metoda zpětné projekce s aplikovanými filtry. Tato skutečnost je ale vyvážena enormními rozdíly v nárocích na výpočetní kapacitu a na složitost aplikace – v [1] je uvedeno, že FBP je až stonásobně rychlejší než numerické metody. Numerické metody sice dávají obecně lepší výsledky, jejich použití v praxi je však z výše zmíněných důvodů velmi omezené a jsou zmiňovány spíše v materiálech vytvořených výzkumníky, kteří se zabývají jejich zefektivněním. Naopak filtrovaná zpětná projekce je pro svou výpočetní nenáročnost používána téměř ve všech tomografických aplikacích.

5 MĚŘICÍ PRACOVISTĚ

Hardware pro měřicí pracoviště lze myšlenkově rozdělit na dvě základní části – část, která obstarává pohyb zdroje zvuku, tedy manipulátor, a část, která provádí samotné měření. Manipulátor byl vytvořen v rámci předcházející bakalářské práce [20], kde je také detailně popsán. Kompletní schematický návrh je zobrazen na Obr. 5.1. Z důvodu většího množství spojů je kvůli přehlednosti napájení zobrazeno červenou barvou, zpětné vazby od limitních snímačů barvou modrou a datové spoje jsou označeny černě. Čárkovanou čarou je zobrazena optická dráha laseru. Na Obr. 5.2 je zobrazen schematický půdorys a bokorys pracoviště s vyznačenými vzdálenostmi mezi zařízeními. Hodnota x v bokorysu pracoviště na Obr. 5.2 se pro použité zdroje liší. Pro větší přehlednost jsou na nákresu zobrazena pouze nejnutnější zařízení, např. zde není zobrazen druhý translační motor, cRIO, atd. Seznam přístrojů, kde je uveden jejich typ a účel, je v Tab. 4 na konci této kapitoly.



Obr. 5.1: Schematické zobrazení návrhu měřicího řetězce



Obr. 5.2 Půdorys a bokorys pracoviště s vyznačenými vzdálenostmi

5.1 Měřicí řetězec

Celý řetězec je ovládán ze zařízení NI PXIe-1082, na kterém je spuštěn software realizující ovládání všech komponent, záznam a zpracování naměřených dat – je mu věnována kapitola 6.

Do NI PXIe-1082 je vložena I/O karta NI PXI-4461. Tato karta je přímo určena pro aplikace zabývající se zvukem a vibracemi. Obsahuje dva analogové vstupy a dva analogové výstupy, přičemž dokáže pracovat na frekvenci 204,8 kS/s s přesností A/D převodníku 24 bitů [21]. Šum karty udávaný výrobcem je v Tab. 1. Zařízení umožňuje konfiguraci diferenciálních i pseudo-diferenciálních vstupů. Tato karta je tedy vhodná jednak pro modulaci zdroje měřeného akustického pole, také dokáže přijímat data z vibrometru.

Sample Rate (kS/s)	Idle Channel Noise ^{*,†}	
	dBV _{rms}	μV _{rms}
$1.0 \text{ kS/s} \leq f_s < 51.2 \text{ kS/s}$	-118 dBV _{rms}	1.3 μV _{rms}
$51.2 \text{ kS/s} \leq f_s < 102.4 \text{ kS/s}$	-115 dBV _{rms}	1.8 μV _{rms}
$102.4 \text{ kS/s} \leq f_s \leq 204.8 \text{ kS/s}$	-111 dBV _{rms}	2.8 μV _{rms}
* Source impedance $\leq 50 \Omega$		
† 30 dB gain		

Tab. 1 Katalogové hodnoty šumu A/D převodníku měřicí karty NI PXI-4461 [21]

Samotné měření akustického pole je prováděno pomocí laserového Dopplerova vibrometru, konkrétně je použit dekodér Polytec OFV-5000 s připojenou měřicí hlavou OFV-505 (Obr. 5.3), laser má vlnovou délku 633 nm. Dekodér má dva výstupy, jeden poskytuje napětí přímo úměrné naměřené rychlosti vibrací, druhý naměřené výchylce. Měřicí hlava, stejně jako odrazné zrcátko, je pevně přidělána ke konstrukci.

Pro měření jsou u poskytnutého modelu OFV-5000 dostupné dva rychlostní dekodéry, VD-02 a VD-06 a dekodér výchylky DD-500. Rozsahy a přesnost rychlostních dekodérů jsou uvedeny v Tab. 2 a Tab. 3. Data pro dekodér výchylky nejsou uvedena, neboť měření výchylky je pro provedené měření neúčinné. Jak je z těchto tabulek zřejmé, hlavní rozdíl u dekodérů spočívá v měřitelných rychlostech a měřitelném frekvenčním rozsahu, přičemž je dekodér VD-02 vhodný pro měření velkých rychlostí s vysokým kmitočtem (až do 1,5 MHz) a VD-06 pro menší rychlosti s kmitočtem do 350 kHz. Instalace senzorové hlavy je výrobcem doporučována tak, aby z důvodu maximální intenzity odraženého paprsku vzdálenost mezi čočkou a odraznou plochou splňovala podmínku

$$x = 234 \text{ mm} + n * 204 \text{ mm}; n = 0,1,2,3, \dots [35]$$

VD-02					
Measurement range	Full scale output (peak) ¹	Typical resolution ²	Frequency range	Max. acceleration	Max. linearity error
mm/s/V	m/s	$\mu\text{m s}^{-1}/\sqrt{\text{Hz}}$		g	%
5	0.05	0.1	0.5 Hz - 0.25 kHz	8,000	1.0
25	0.25	0.5	0.5 Hz - 1.5 MHz	240,000	1.5
125	1.25	0.6	0.5 Hz - 1.5 MHz	1,200,000	1.0
1,000	10	2.5	0.5 Hz - 1.5 MHz	9,600,000	1.0

Tab. 2 Dostupné rozsahy dekodéru VD-02 [36]

VD-06					
Measurement range ¹	Full scale output (peak) ²	Typical resolution ³	Frequency range	Max. acceleration	Max. linearity error
mm/s/V	m/s	$\mu\text{m s}^{-1}/\sqrt{\text{Hz}}$	kHz	g	%
1	0.01	0.01	0 - 20	128	0.1
2	0.02	0.05	0 - 350	4,500	0.1
10	0.10	0.05	0 - 350	22,000	0.1
50	0.50	0.06	0 - 350	110,000	0.1

Tab. 3 Dostupné rozsahy dekodéru VD-06 [36]



Obr. 5.3 Dekodér Polytec OFV-5000 a měřicí hlava Polytec OFV-505 [37]

5.2 Mechanický manipulátor

Pro pohyb se zdrojem zvuku slouží manipulátor vytvořený v rámci předcházející bakalářské práce [20]. Ten se skládá z jednoho rotačního a dvou translačních pohybových členů a řídicího hardwaru, který tyto členy ovládá.

Translační členy (na Obr. 5.1 označeny číslicí 1) se skládají z lineárních posuvů Standa 8MT195, u kterých byla pohonná jednotka vyměněna za inteligentní krokový motor NI ISM 7402. Z těchto dvou členů je však v konečné aplikaci použit pouze posuv, na kterém je přidělán rotační člen, na Obr. 5.1 je umístěn kolmo na laserový paprsek. Pro natáčení zdroje zvuku slouží rotační krokový motor Standa 8ME190-2-28 (na Obr. 5.1 označen číslicí 2). Všechny tyto členy obsahují koncové spínače – u translačních členů na obou stranách posuvu, u rotačního členu se nachází na úhlu natočení 5°. Tyto spínače na manipulátoru slouží jednak pro kontrolu pozice a jednak pro inicializaci při prvním spuštění.



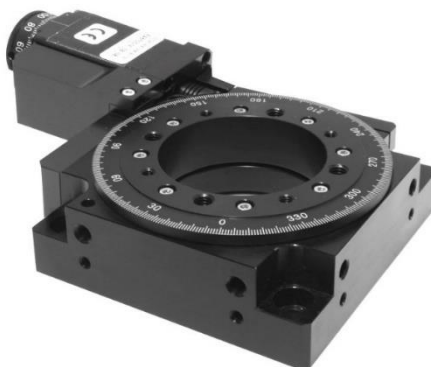
Obr. 5.4: Translační člen Standa 8MT195 (vlevo) a inteligentní krokový motor NI ISM-7402 (vpravo) [20]

Motory určené pro translační posun jsou napájeny ze zdroje NI PS-15. Tento zdroj také napájí zařízení CompactRIO, které celý manipulátor řídí – použitý model je cRIO 9068. Toto modulární zařízení má vložené tři I/O karty, které obstarávají řízení motorů a detekci stavu koncových spínačů.



Obr. 5.5: CompactRIO 9068 [20]

První karta NI 9501 je určena pro řízení krokových motorů, v případě manipulátoru je k ní připojen rotační člen. Podporuje jak dvoufázové bipolární (použité), tak unipolární zapojení a zvládá proud ve fázi 3 A, ve špičce až 4,24 A.



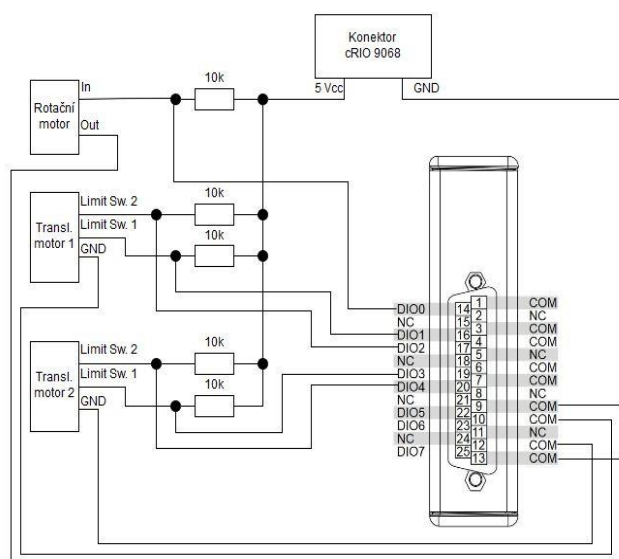
Obr. 5.6: Rotační krokový motor Standa 8ME190-2 [20]

Dále je do cRIO připojená karta SISU 1004. V předchozím textu bylo zmíněno, že původní motory translačních členů byly vyměněny za inteligentní krokové motory od firmy National Instruments. Tyto motory obsahují i řídicí elektroniku a na vstupech přijímají binární signály STEP, DIR a EN. Karta SISU 1004 je pro řízení inteligentních krokových motorů určena, dokáže zároveň řídit až čtyři najednou. S motory je propojená konektory RJ-45, tedy ethernetovými kabely.

Poslední kartou je model NI 9401. Ta je v případě manipulátoru určena k detekci stavu koncových spínačů jednotlivých akčních členů. Karta obsahuje 8 binárních vstupů/výstupů, které pracují s logickou úrovní signálu 5 V. Schéma zapojení obvodu koncových spínačů je na Obr. 5.8. Jeho napájení je vyvedeno z volného konektoru zařízení cRIO.



Obr. 5.7: Použité I/O karty – NI 9401 (vlevo), NI 9501 (uprostřed), SISU 1004 (vpravo) [20]



Obr. 5.8: Schéma zapojení koncových spínačů [20]

Typ zařízení	Model	Účel zařízení
PC	NI PXIe-1082	Ovládání celého měřicího řetězce Záznam, zpracování a zobrazení dat
Stabilizovaný zdroj	NI PS-15	Napájení CompactRIO
CompactRIO	cRIO 9068	Ovládání manipulátoru Napájení obvodu limitních spínačů
I/O karta	NI PXI-4461	Modulace zdroje zvuku Získání dat z LDV
	NI 9501	Řízení rotačního členu
	SISU 1004	Řízení translačních členů
	NI 9401	Zjišťování stavu limitních spínačů
Rotační člen	Standa 8ME190-2	Zajišťuje natáčení zdroje zvuku
Translační člen	Standa 8MT195	Zajišťuje posun zdroje zvuku
Krokový motor	NI ISM-7402	Pohon translačních členů
LDV	Polytec OFV- 5000+OFV-505	Měření integrálu akustického tlaku
Zrcátko	---	Pevná odrazná plocha

Tab. 4: Seznam hardwaru použitého pro bezkontaktní měření akustických polí

6 SOFTWARE

V této kapitole je popsán ovládací software, který byl pro účely měření vytvořen. Veškerý software je vytvořen v programu LabVIEW od firmy National Instruments. Algoritmus měření lze rozdělit na tři základní části – polohování zdroje zvuku, akvizice dat a zpracování naměřených dat. Za polohování zdroje zvuku lze považovat program, který byl vytvořen pro ovládání manipulátoru v rámci předcházející bakalářské práce [20]. K akvizici dat lze zařadit modulaci zdroje zvuku a přečtení výstupů z LDV. Zpracováním naměřených dat je myšlena inverzní Radonova transformace a zobrazení výsledku.

6.1 Ovládání manipulátoru

Jak je znázorněno na Obr. 5.1, samotný manipulátor je řízen ze zařízení CompactRIO, které má v sobě zasunuty 3 I/O karty. Software pro ovládání manipulátoru se skládá ze dvou základních částí. Na zařízení cRIO je spuštěna na real-time procesoru konfigurace programovatelného hradla FPGA, která zajišťuje komunikaci mezi připojeným PC a I/O kartami – v této části neproběhly žádné modifikace kódu. Další část je program nacházející se přímo v PC (nebo v našem případě v zařízení NI PXIe-1082), který obsahuje interface určený k ovládání celého zařízení.

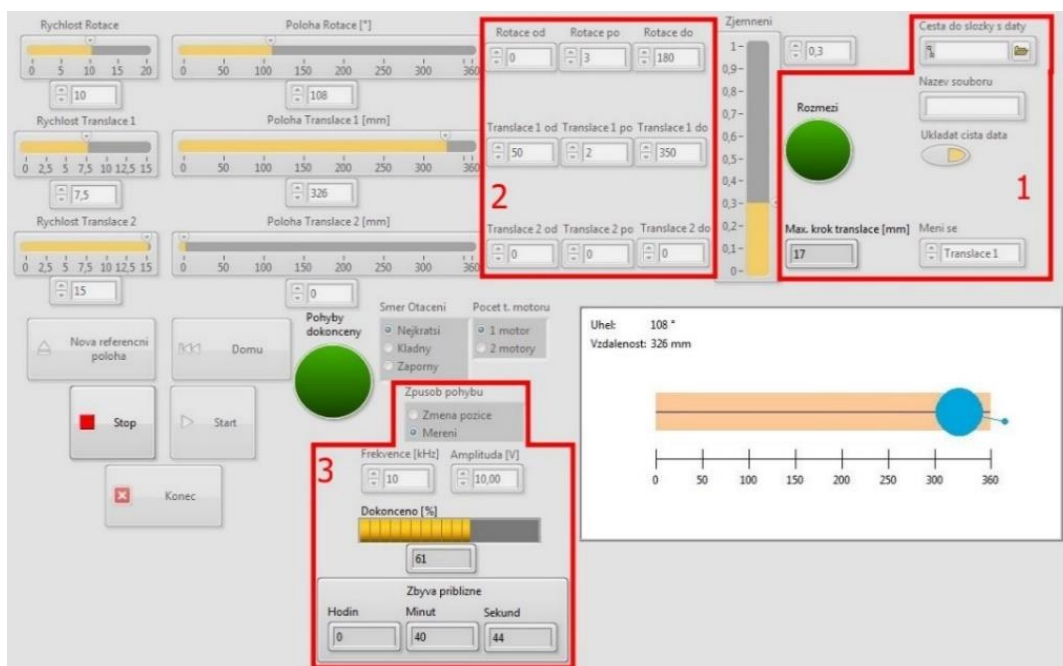
Samotné zařízení cRIO obsahuje konfigurovatelné hradlové pole a real-time procesor. V rámci bakalářské práce [20] byla vytvořena konfigurace tohoto FPGA, která umožňuje ovládání všech třech I/O karet naráz. Z konfigurace byl následně vytvořen bitový soubor, který je spuštěn na real-time procesoru zařízení. Konfigurace hradlového pole zajišťuje propojení mezi kartami a modulem SoftMotion, který je součástí programu LabVIEW. Tento modul je přímo určen k ovládání motorů, kdy se každý motor v programu jeví jako osa, které uživatel dává příkazy k pohybu. Při správné konfiguraci modul dokáže sám hlídat pozici motorů, stav jejich koncových spínačů atd. Vzhledem ke složitosti a vysoké časové náročnosti však byla konfigurace provedena pouze částečně a modul podporuje pouze základní ovládání motorů, konkrétně příkazy provádějící relativní pohyb, tj. o kolik milimetrů/stupňů se má motor posunout. Veškeré ostatní funkce, tedy hlídání pozice a kontrola stavu koncových spínačů jsou řešeny v programu v PC.

CompactRIO je přes ethernetový kabel připojen na zařízení NI PXIe-1082, na kterém se nachází program, pomocí kterého uživatel manipulátor ovládá. Jak bylo zmíněno v předchozím odstavci, nejenom že program pomocí modulu SoftMotion posílá motorům příkazy k pohybu, zajišťuje také sledování aktuální pozice os a kontroluje stavy koncových spínačů. Program také obsahuje vizualizaci, která zobrazuje aktuální pozice a indikuje, u jakého motoru právě dochází k pohybu.

Je důležité zmínit, že funkce nutné pro polohování zdroje zvuku nebyly v programu přítomny. Celý algoritmus byl vytvořen tak, aby uživatel zadal pozici motorů, stisknul tlačítko „Start“, akční členy se na zadané pozice přesunuly a program znovu čekal na reakci uživatele. Toto je ale pro potřeby měření nevhodné chování. Je totiž potřeba zadat rozsah pozic, po kterých se mají motory pohybovat a následně na těchto pozicích provádět měření. Tohoto chování lze dosáhnout několika způsoby. Bud' lze vytvořit další nadřazený program, který se napojí na ovládací prvky programu původního. Obsahoval by požadovaný rozsah, přičemž by vždy nastavil pozici, počkal, až by se na ní manipulátor přesunul a provedl měření. Poté by do původního programu zadal novou pozici atd. Další existující možností je použít pouze základní bloky určené pro pohyb a vytvořit pro ovládání úplně nový program. Tyto bloky však neobsahují kontrolu stavu koncových snímačů ani detekci aktuální pozice os, uživatel by tedy nedostával informace o aktuálním stavu celého zařízení a velké množství funkcí již přítomných v dodaném programu by muselo být vytvořeno znovu (např. inicializace pozic motorů při spuštění programu). Poslední možností je modifikace aktuálního programu tak, aby požadované funkce obsahoval – k této variantě bylo nakonec přistoupeno.

6.2 Front Panel

Z důvodu přidání nových funkcí bylo rozšířeno uživatelské rozhraní, které nyní obsahuje možnost nastavení parametrů pohybu, generovaného signálu či volbu způsobu uložení dat. Nově přidané funkce jsou na Obr. 6.1 ohraničeny červenými obdélníky. Na ovládacím prostředí se ještě nachází grafy zobrazující aktuálně naměřená data přímo z LDV, amplitudu z Fourierovy transformace na právě měřené frekvenci, sinogram (v průběhu měření postupně doplňovaný) a nakonec graf s rekonstruovaným obrazcem. Kvůli přehlednosti a úspoře místa ale nejsou na Obr. 6.1 zobrazeny.



Obr. 6.1 Prvky nově přidáné na interface

Do pole „Cesta do složky s daty“ nacházejícím se v obdélníku s označením 1 uživatel zadává, kam má program naměřená data ukládat. Pokud pole zůstane prázdné, program data uloží do složky Data nacházející se v hlavní složce programu. Na podobném principu funguje pole „Název souboru“. Uživatel zde může zadat požadovaný název, pod kterým se naměřená data uloží – zadává se samotný název, koncovku souboru program již přidá sám. Pokud zůstane pole prázdné, program automaticky vytvoří název z časové značky ve formátu ROK_MESIC_DEN_HODINA_MINUTA_SEKUNDA. V případě, kdy je do pole „Název souboru“ zadán takový název, který v zadané složce již vyskytuje, program soubor automaticky bez předchozího upozornění přepíše.

Jak již bylo zmíněno, program k souboru dodá koncovku sám, a to z toho důvodu, že poskytuje možnost ukládat soubory dva. Jeden ukládaný soubor má formát txt a obsahuje tabulku dat sinogramu, přičemž první řádek tabulky nejsou data naměřená, ale informace o provedeném měření (např. rozsahy atd.). Tento soubor je programem vytvořen vždy po ukončení měření.

Druhý soubor je řízen tlačítkem „Ukladat cista data“ (zmáčknuté tlačítko znamená, že se soubor vytvoří). Program vytvoří tdms soubor, který obsahuje původní data z LDV. Pro zobrazování naměřených dat a pro extrakci dat z tdms souboru je v projektu přítomen soubor Cteni.vi, o němž pojednává kapitola 6.4. Vytváření tohoto souboru je kvůli jeho velikosti defaultně vypnuté, již pro poměrně nepřesné měření s krokem 5 mm a 10° se velikost souboru pohybuje okolo 400 MB, sinogram naměřených dat, který uživatele pravděpodobně zajímá nejvíce, má však zhruba 10 kB.

Pod tlačítkem, které volí, zda se mají ukládat i původní naměřená data, se nachází rozevírací nabídka s názvem „Meni se“. Tato nabídka uživateli umožňuje, aby zvolil, jaký motor se bude v průběhu měření měnit častěji. Jestliže tedy uživatel chce, aby rotační motor projel celý svůj zadaný rozsah, následně se posunul translační motor na další pozici, a tak stále dokola, zvolí v nabídce položku „Rotace“. Jestliže má celý svůj rozsah projet translační motor a poté rotační přejít na následující pozici, je třeba zvolit položku „Translace 1“.

Vedle nabídky „Meni se“ se nachází pole „Max. krok translace [mm]“. To je do programu přidáno pouze pro orientační účely. Algoritmus pouze ze zadané frekvence spočítá vlnovou délku zvukové vlny ze zadané frekvence (počítá se s rychlostí zvuku 340 m/s) a vypíše maximální krok translace, aby byl splněn Shannon-Kotelnikovův teorém (tedy vlnovou délku vydělí dvěma). Tato hodnota ale představuje maximální přípustný krok, v praxi je však nutné pro kvalitní výsledky zadávat maximálně polovinu této hodnoty (je rozebráno v kapitole 7.2.5).

Ovládací prvky přidané v obdélníku označeném číslem 2 slouží k nastavení požadovaných parametrů posuvu manipulátoru, tedy počátek a konec drah pro oba motory a krok, s jakým se motory mají posouvat. Hodnoty musí být zadány tak, aby nebyla koncová pozice menší nebo rovná počáteční pozici a aby byl počet kroků v zadaném rozmezí celistvý. Tyto požadavky hlídá i program a pokud nejsou splněny, červeně se rozsvítí ikona „Rozmezi“ nacházející se v obdélníku označeném číslem 1 a algoritmus při stisknutí tlačítka „Start“ neprovede žádnou akci. Program byl upraven tak, aby dokázal v zadaném rozmezí pozic pohybovat i druhým translačním motorem, s jeho použitím se ale u kódu zajišťujícím měření nepočítá. V rozmezí se motor tedy pohybovat může, při jeho použití však není možné provádět měření a zaznamenávat data.

Nabídka v položce „Zpusob pohybu“ nacházející se v obdélníku s označením 3 přepíná mezi klasickým pohybem manipulátoru, tedy že se zadá pozice a manipulátor na ní přejede, a mezi prováděním měření. Změnou položky v této nabídce se také povolují a zakazují příslušné prvky ovládacího prostředí, např. při volbě měření se zakáží prvky, které slouží k přímému ovládání motorů.

Pod volbou způsobu pohybu se nachází ovládací „Frekvence“ a „Amplituda“, které slouží k zadávání parametrů pro připojený zdroj zvuku. Prvek „Frekvence“ také slouží k určení, jaká složka signálu se má z naměřených dat extrahovat (viz kapitola 6.3.3). Program automaticky počítá se skutečností, že je na výstupu AO0 měřicí karty NI PXI-4461 zdroj zvuku připojen a sinusový signál je zde generován vždy. Jestliže by chtěl uživatel výstup vypnout musí zadat do pole „Amplituda“ hodnotu 0.

Nakonec se v obdélníku 3 nachází ukazatel průběhu, který přibližně zobrazuje, kolik procent z celkového počtu měření již bylo dokončeno a ukazatel

zobrazující očekávanou dobu do dokončení celého měření. Ukazatele jsou ale pouze orientační, na začátku měření program zjistí, jak dlouho trvá jedno měření a touto hodnotou následně násobí zbývající počet měření. Algoritmus je tedy necitlivý např. k rozdílným dobám posuvu u rotačního a translačního členu.

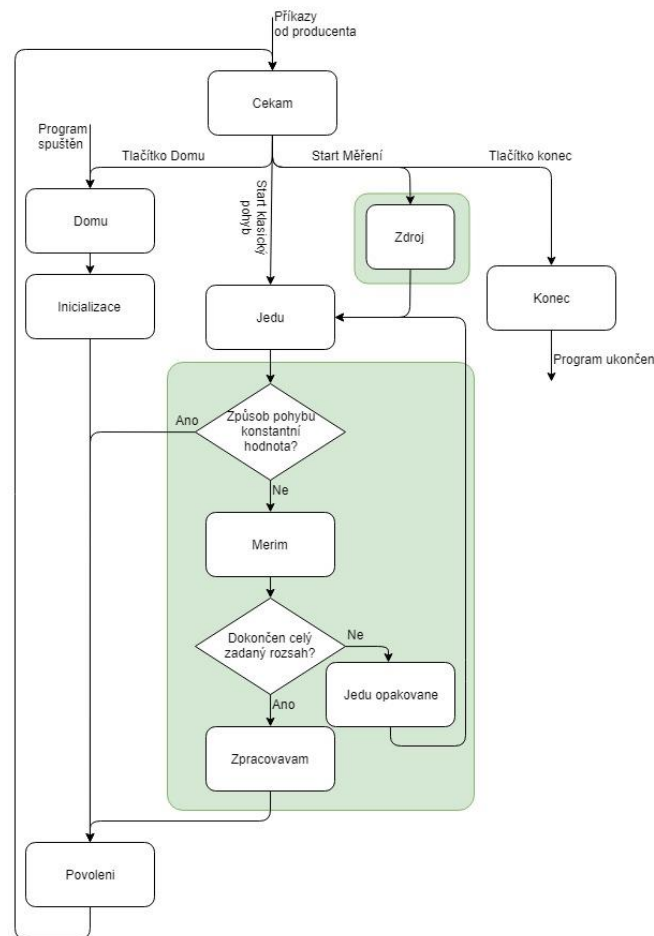
6.3 Block Diagram

Pro program byla použita architektura producent-konzument. Obsahuje dvě while smyčky, kdy jedna analyzuje signály ze vstupů a akce provedené uživatelem a posílá příslušné instrukce druhé, která ovládá motory. Díky této architektuře lze program poměrně jednoduše modifikovat a přidávat do něj nové funkce, lze ho tedy použít nejenom pro ovládání manipulátoru, ale i pro akvizici dat, jejich zpracování a zobrazení výsledků.

Smyčka producenta je koncipována jako stavový automat se dvěma stavy. Po spuštění programu se automat přepne do stavu Init, ve kterém se inicializují proměnné kriticky nezbytné pro správný běh programu a nastaví minimální a maximální hodnoty pro ovládací prvky určené pro nastavení pozice motorů. Následně se program přepne do dalšího stavu, který obsahuje event strukturu. Ta každých 10 ms provede výpočet současné pozice motorů a aktualizuje vizualizaci. Dále při stisknutí ovládacích prvků kontroluje zadané hodnoty, povoluje či zakazuje ovládací prvky a posílá příkazy smyčce konzumenta – např. při stisknutí tlačítka „Start“ se zakáží všechny ovládací prvky, povolí se tlačítko „Stop“ a do smyčky konzumenta se pošle příkaz ke spuštění pohybu.

Smyčka konzumenta je vytvořena jako stavový automat, kdy první stav očekává příkazy od smyčky producenta a následně se větví podle příkazu, který od producenta přijde. Při spuštění programu automat najede s motory na počáteční pozici, následně očekává instrukce.

Stavový diagram upraveného automatu je zobrazen na Obr. 6.2. Ve většině již existujících stavů jsou provedeny menší změny, týkají se spíše oprav chyb či vylepšení komunikace s přidávanými funkcemi, a tudíž nejsou blíže popsány. Hlavní úprava smyčky spočívala v přidání nových stavů, ty jsou na stavovém diagramu ohraničeny zeleně.



Obr. 6.2 Upravený stavový automat smyčky konzumenta

Zeleně ohraničená část představuje jednu větev automatu, kdy uživatel zvolí ve výběru „Zpusob pohybu“ „Měření“, navolí parametry posuvu (rozsahy, frekvenci atd.) a stiskne tlačítko „Start“.

Automat nejdříve nastaví parametry měřicí karty. Následně přejede na počáteční pozici a začne s měřením. Poté se zacyklí, dokud není měření dokončeno. Nakonec po projití všech pozic naměřená data uloží a provede rekonstrukci pomocí inverzní Radonovy transformace. Detailněji jsou stavy popsány v následujících kapitolách.

6.3.1 Nastavení parametrů měřicí karty

Automat se nejdříve přepne do stavu „Zdroj“. Zde je primárně řešena konfigurace měřicí karty NI PXI-4461. Pro vstup AI0 a výstup AO0 se nastaví rozsah napětí ± 10 V. Jestliže je uživatelem nastavená frekvence menší, než 40 kHz, jako vzorkovací frekvence je pro oba kanály karty nastaveno 100 kHz. Pro vyšší frekvence je nastavena maximální vzorkovací kmitočet, kterého je karta schopna, tedy 204 kHz. Pro výstupní kanál je zde vytvořen sinusový signál o zadané frekvenci

a amplitudě. Vstup AI0 je zde nastaven tak, aby přijímal data při zvolené frekvenci přesně 0,1 sekundy. Dále je v tomto stavu inicializována matice určená pro data sinogramu a jsou zde nastaveny parametry pro osy grafů tak, aby byla data správně okótována. Nakonec je vygenerována časová značka, která je (jak je zmíněno v kapitole 6.2) použita jako defaultní název pro naměřené soubory a je vygenerována defaultní cesta, kam se mají soubory ukládat.

6.3.2 Polohování motorů

Pro požadované polohování motorů byly provedeny drobné změny ve stavu „Jedu“, který zajišťuje pohyb. Stav na svém počátku vyhodnotí, jestli se všechny akční členy nachází na požadované pozici přečtením hodnot z posuvníků „Poloha Rotace“, „Poloha Translace 1“ a „Poloha Translace 2“ a jejich porovnáním s lokálními proměnnými udávajícími aktuální pozici, na které se motory doopravdy nacházejí. Pokud se hodnoty liší, motory jsou na pozici zadanou posuvníky přesunuty. Následně je vyhodnoceno, jestli je zvolena volba měření. Jestliže ne, jsou jednoduše povoleny ovládací prvky a automat čeká na další instrukce. V případě měření je provedena akvizice dat. Posun motorů v zadaném rozsahu je řízen stavem „Jedu opakovaně“. V něm je vyhodnocováno, na jaké pozici se motory nacházejí a podle zvolené možnosti v nabídce „Meni se“ požadovanou pozici upraví na posuvnících. Poté je automat opět přepnut na stav „Jedu“, který motory na pozici přesune.

6.3.3 Akvizice dat

Samotné měření pomocí vibrometru je zajišťováno ve stavu nazvaném „Merim“. Měřící karta zde 0,1 sekundy zaznamenává signál z dekodéru.

Pokud si to uživatel zvolil, tato data jsou uložena v tdms souboru. Data se pro každou pozici ukládají pod specifickým kanálem, jehož název vypovídá o parametrech, při nichž bylo měření provedeno a které jsou nutné pro extrakci dat a rekonstrukci obrazu. Názvy jednotlivých kanálů jsou generovány podle vzoru „F[měřená frekvence]R[aktuální pozice rotace],[krok rotace]T[aktuální pozice translace],[krok translace]“. Pro měření, při němž bylo generováno akustické pole o frekvenci 20,5 kHz, rotační motor se nacházel na pozici 20° s krokem 3° a translační motor se nacházel na pozici 10 mm s krokem 1 mm, má název kanálu tvar „F20,50R20,3T10,1“.

Data z LDV jsou také poslána do jednoduchého SubVI s názvem „FFT_max“, které z nich extrahuje data pro sinogram. Vstupem do tohoto podprogramu je signál naměřený LDV a frekvence měřeného zvuku. SubVI na signál nejdříve aplikuje rychlou Fourierovu transformaci, přičemž následně pracuje pouze s amplitudovou charakteristikou – fázová pro další analýzu není potřeba. Amplitudová charakteristika je poté poslána do funkce „Extract Single Tone Information“, která

v okolí zvolené frekvence (která je jedním ze vstupů do podprogramu) najde lokální maximum. Tím se minimalizují malé posuny ve frekvenční charakteristice, které by mohly být zapříčiněny chybou transformace nebo chybou zaznamenaných dat. To také ovšem znamená, že by bylo při výskytu velmi vysokých rušení na frekvencích velmi blízkých měřenému kmitočtu změřeno toto rušení a data by nebyla relevantní. Na svém výstupu podprogram poskytne tuto naměřenou hodnotu maxima a amplitudovou charakteristiku celého naměřeného signálu.

Stav „Merim“ data z Fourierovy transformace zobrazí do grafu na Front Panelu a získané maximum zapíše do matice hodnot představující sinogram. Poté stav počká na synchronizační impuls od smyčky producenta (aby u proměnných sledujících aktuální pozici motorů nedocházelo při krátké době měření k problémům s dataflow). Nakonec stav vyhodnotí, zda byly naměřeny všechny hodnoty či ještě zbývají neproměřené pozice a podle toho přepne automat na příslušný stav.

6.3.4 Zpracování dat

Jestliže byly všechny pozice proměřeny, je stavový automat smyčky konzumenta přepnut na stav „Zpracovávám“. Zde jsou data sinogramu uložena do textového souboru a jsou uzavřeny reference pro kanály měřicí karty. Do prvního řádku matice textového souboru jsou uloženy informace o parametrech měření, konkrétně jde o měřenou frekvenci a počáteční a koncovou pozici a krok měření pro jednotlivé motory.

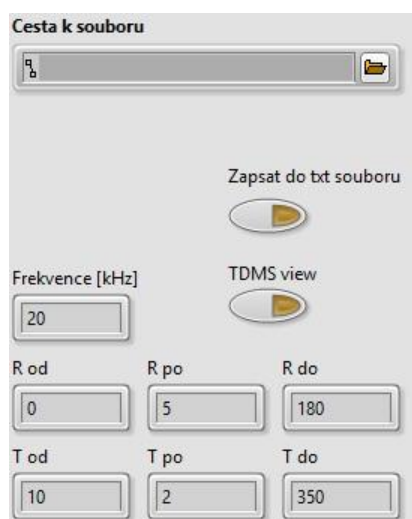
Data v sinogramu jsou uloženy amplitudy napětí, které byly na příslušné frekvenci z naměřených dat extrahovány. Pro převod těchto hodnot na hodnoty integrovaného akustického tlaku provádí SubVI s názvem „Prevod“, které pro tuto operaci používá vztah (12).

Upravené hodnoty jsou poté dány jako vstup do podprogramu „Inverse Radon“. Toto SubVI provádí ze sinogramu a hodnoty kroku rotace proces inverzní Radonovy transformace. Třetí vstup udává, jakým algoritmem se má tato transformace provést. Z důvodů uvedených v kapitole 4.4, tedy výpočetní nenáročnosti a jednoduché implementaci umí algoritmus rekonstruovat obrazec pomocí metody zpětné projekce a její verze s aplikovanými filtry. Numerické metody byly pro tuto aplikaci vyhodnoceny jako neperspektivní, neboť by jejich implementace byla kvůli obrovským rozměrům matic velmi složitá a nároky na výpočetní výkon by dalece přesahovaly možnosti zařízení, na kterém by byl software spuštěn. Zpětná projekce je vytvořená naprogramováním vztahu (33). Její filtrovaná verze má ještě před samotnou rekonstrukcí na sinogram ve frekvenční oblasti aplikovaný filtr typu rampa a dolní propust', konkrétně Hannovo okno, které má jako zlomovou frekvenci nastavenou desetinu maximální frekvence.

Rekonstruovaná data jsou poté na Front Panelu zobrazena v prvku typu Intensity Graph. Nakonec automat povolí všechny prvky uživatelského rozhraní a celý program čeká na další instrukce od uživatele.

6.4 Čtení naměřených dat

Naměřená data jsou ukládána ve formě textového souboru, který na prvním řádku obsahuje i informace o parametrech měření. Také existuje možnost do tdms souboru ukládat nezpracované průběhy signálu přímo z vibrometru. Aby bylo možné data jednoduše přečíst a analyzovat, bylo v projektu vytvořeno VI s názvem „Cteni.vi“, část jeho uživatelského rozhraní je na Obr. 6.3. Na uživatelském rozhraní se nachází ještě množství grafů, které na tomto obrázku nejsou kvůli přehlednosti zobrazeny. Tyto grafy jsou používány v kapitole 7.2, kde jsou diskutovány naměřené výsledky.



Obr. 6.3 Část ovládacího rozhraní Cteni.vi

Uživatel v tomto programu zadá cestu k souboru s naměřenými daty, která chce zobrazit, a program spustí. Program rozezná, k jakému typu souboru byla cesta zadána. Pokud je zadán příkaz k otevření textového souboru, program vyextrahuje informace o měření – tj. frekvence, počáteční a koncová pozice a krok rotačního a translačního motoru jsou zobrazeny v příslušných polích. Poté jsou data sinogramu zpracována a vše je zobrazeno v příslušných grafech.

V případě, že program detekuje otevření souboru tdms, začne z tohoto souboru nejdříve data sinogramu extrahovat. Algoritmus postupně prochází názvy jednotlivých kanálů a hledá nejmenší a největší hodnotu pozic rotačního a translačního motoru, jaká je v těchto názvech zaznamenána. Po jejich nalezení tato data (spolu s frekvencí a krokem motorů) opět zobrazí do uživatelského rozhraní. Následně začne algoritmus na základě těchto dat postupně zpětně generovat názvy kanálů. Název je předán do funkce „TDMS Read“, která na svém výstupu předá

zvolený průběh. Z tohoto průběhu je pomocí SubVI „FFT_Max“ zmíněného v kapitole 6.3.3 zjištěna amplituda zvolené frekvence Fourierovy transformace a ta je uložena do matice hodnot. Tímto způsobem je postupně rekonstruován sinogram, který je uložen v textových souborech. Po kompletní rekonstrukci se k datům program chová stejně, jako k datům přečteným z textových souborů se sinogramem.

Jestliže uživatel otevírá tdms soubor a chce zobrazit jeho konkrétní obsah, může před spuštěním programu zmáčknout tlačítko „TDMS view“. To spustí utilitu TDMS File Viewer, která obsah souboru zobrazí. Program se ale při otevření tohoto nástroje pozastaví a extrahovaná data zobrazí až při jeho zavření.

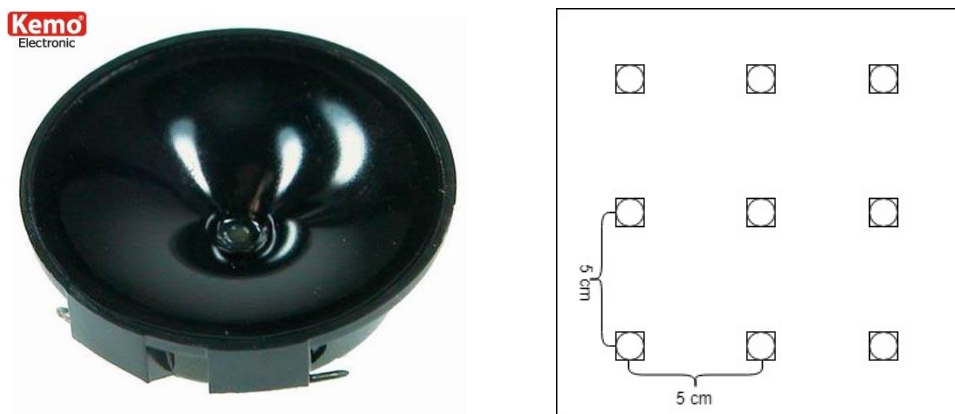
Poslední možnost, kterou program nabízí, je data extrahovaná z tdms souboru nechat uložit do textového souboru. Tato možnost se zde nachází např. pro případ, kdy by uživatel zjistil chybu v datech sinogramu (např. zvolil špatnou frekvenci pro zjištění amplitudy ve Fourierově transformaci) a měl dostupná původní naměřená data. V tomto případě tedy zmáčkne tlačítko „Zapsat do txt souboru“. Je však nutné upozornit, že program vytvoří textový soubor, který má (samozřejmě kromě koncovky) název totožný s tdms souborem a uloží se do stejné složky. Pokud se na dané pozici již takový soubor nachází, program ho bez předchozího upozornění přepíše.

Výše bylo zmíněno, že Cteni.vi obsahuje i několik grafů. Jeden z grafů zobrazuje naměřené amplitudy z FFT, tedy sinogram. Dále je zde přítomen graf zobrazující poměr naměřených dat k šumu v decibelech. Poté se zde nachází graf zobrazující rekonstruovaný obraz, rekonstrukce je zde docílena pomocí VI „Inverse Radon“ popsáno v kapitole 6.3.4. Obrazec je zde zobrazen jednak v grafu intenzity, přítomna jsou také data zobrazená v 3D grafu. Jestliže uživatel otevírá tdms soubor, zobrazí se ve dvou grafech ještě průběhy amplitud Fourierovy transformace pro nejvyšší a nejnižší amplitudu zvolené frekvence ze všech měření. Tato funkce se zde nachází, aby měl uživatel přehled o rozsahu hodnot, v jakých se měřené hodnoty pohybují vzhledem k šumu měření.

7 NEPŘESNOSTI V MĚŘENÍ

Pro různá nastavení parametrů měření byly proměřeny celkem tři zdroje akustických polí. Samotný měřicí aparát, tedy manipulátor s přidělaným akustickým zdrojem a měřicí hlavice laserového vibrometru byly v průběhu měření pevně přidělaný na konstrukci nacházející se v bezodrazové komoře o délce vnitřních stěn 1,25 m a výšce 1,55 m. Na dekodéru OFV-5000 byl pevně zvolen dekodér VD-06 s rozsahem 2 mm/V. Byly také zvoleny filtry horní propusti s frekvencí 100 Hz a dolní propusti s frekvencí 100 kHz.

Byla proměřována akustická pole pro celkem tři typy testovacích zdrojů. První měření bylo prováděno pouze s jedním akustickým monopólem. Konkrétně byl na manipulátoru přidělán ultrazvukový piezoelektrický reproduktor Kemo L010. Konstrukce byla v tomto případě provedena tak, že se měřicí laser nacházel 130 mm nad reproduktorem. Dalším měřeným zdrojem byl akustický dipól. V tomto případě byly použity dva reproduktory Kemo L010, které byly napevno přidělaný vedle sebe (mezi středy reproduktorů byla vzdálenost 6 cm) a byly propojeny tak, aby byl emitovaný zvuk v protifázi. Tento dipól byl nainstalován tak, že byla mezi horní stranou reproduktorů a laserovým paprskem vzdálenost 55 mm. Jako poslední byla pro měření použita deska plošných spojů osazená devíti ultrazvukovými reproduktory vysílajícími vlnění o frekvenci 40 kHz, přičemž všechny reproduktory vysílaly ve fázi. Vzdálenost mezi laboratorním přípravkem a laserovým paprskem byla 48 mm.

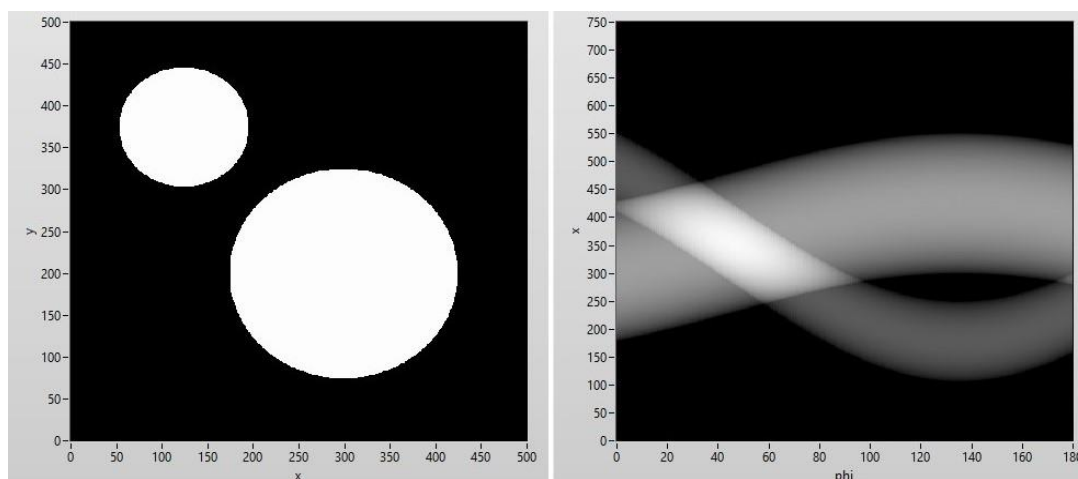


Obr. 7.1 Piezoelektrický reproduktor Kemo L010 (vlevo) a deska plošných spojů s devíti reproduktory (vpravo)

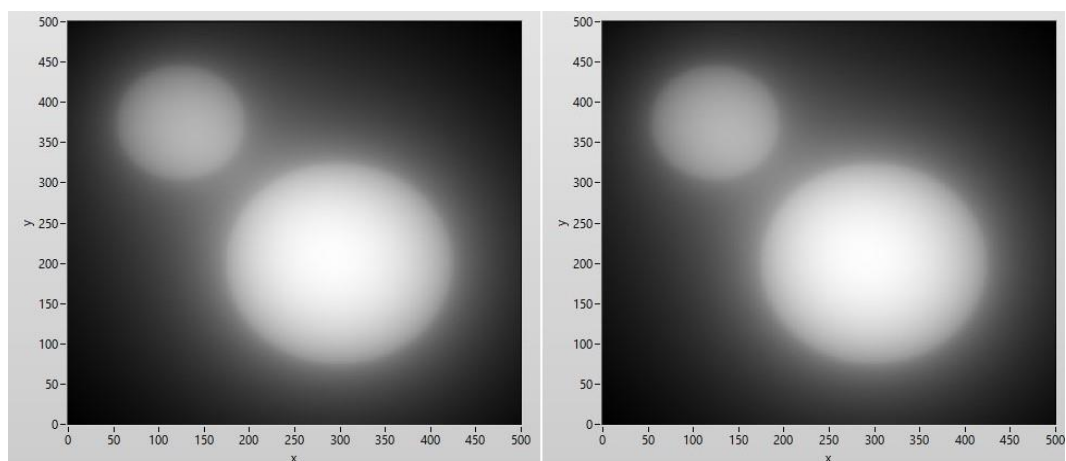
7.1 Funkčnost algoritmu zpětné projekce

Před analýzou měřicího řetězce a vlivů okolí určíme kvalitu implementace algoritmu samotné zpětné projekce, neboť naměřené výsledky jsou na kvalitě algoritmu silně závislé. Pro tuto demonstraci byl vytvořen skript v programu MATLAB. Tento skript vygeneruje obrazec, ze kterého je následně pomocí funkce `radon()` vytvořen sinogram. Na sinogram je poté aplikována funkce `iradon()`, která provede pomocí algoritmu zpětné projekce, který je součástí programu, rekonstrukci obrazce. Všechny tři matice hodnot, tedy původní obrazec, sinogram i rekonstruovaný obrazec, jsou pomocí souborů csv přeneseny do LabVIEW. Tam se na sinogram aplikuje vytvořený algoritmus zpětné projekce a výsledky jsou porovnány. Program MATLAB má ve funkci `iradon()` zavedenu automatickou volbu filtrů (Shepp-Logan, Hamming, Hann atd.), kdy program sám rozhoduje, jaký filtr použít. Aby bylo porovnání co nejrelevantnější, ve skriptu je algoritmu vnuceno použití Hannova okna. Jestliže je v následujícím textu uvedeno, že obrazec pochází z LabVIEW, je tím myšleno, že byla rekonstrukce provedena pomocí vytvořeného SubVI „Inverse Radon“ diskutovaného v kapitole 6.3.4. U grafů filtrované i nefiltrované verze rekonstruovaných obrazců nejsou kvůli úspoře místa pro grafy intenzity zobrazeny konkrétní hodnoty, jakých obrazce nabývají. U nefiltrované verze dodávají MATLAB i LabVIEW hodnoty, které nejsou pravdivé a samotné normování na správné hodnoty probíhá až u filtrace. Hodnoty filtrované verze jsou pro MATLAB i LabVIEW naopak téměř totožné s originálem, jejich konkrétní hodnoty jsou vidět v grafu hodnot řezu středem obrazce.

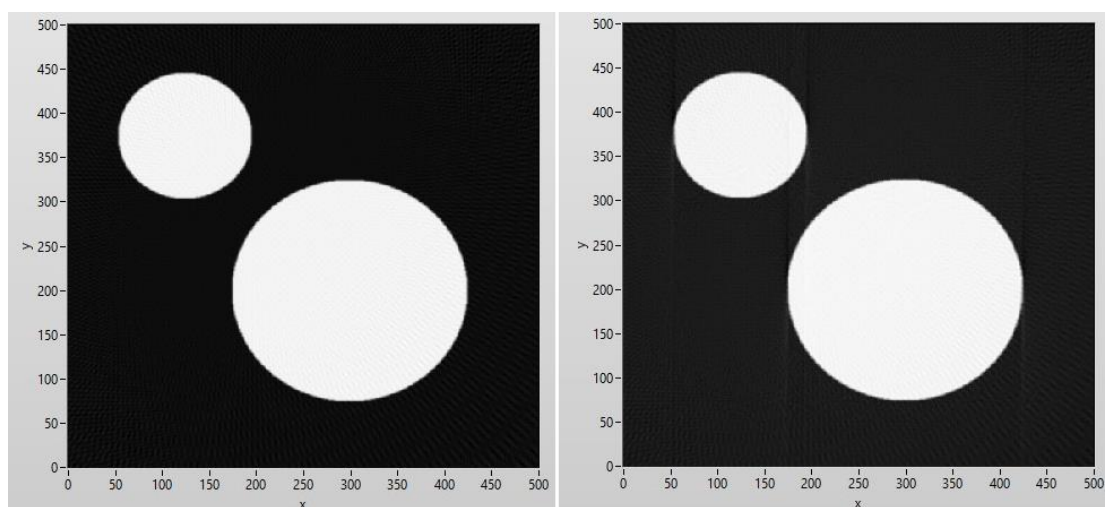
Jako první obrazec je zvolena matice hodnot, kdy má celá matice hodnotu 0 a nachází se v ní dvě oblasti s hodnotami 1, které mají tvar různě velkých kruhů. Nejdříve byla na sinogram aplikována metoda zpětné projekce bez aplikovaného filtru, poté s filtrem Hannovo okno. Nakonec je zobrazeno porovnání hodnot řezu originálním obrazcem a oběma rekonstruovanými. Graf má modrou čarou označené hodnoty originálu, zelenou čarou hodnoty z algoritmu z programu MATLAB a červenou čarou hodnoty z vytvořeného algoritmu z LabVIEW.



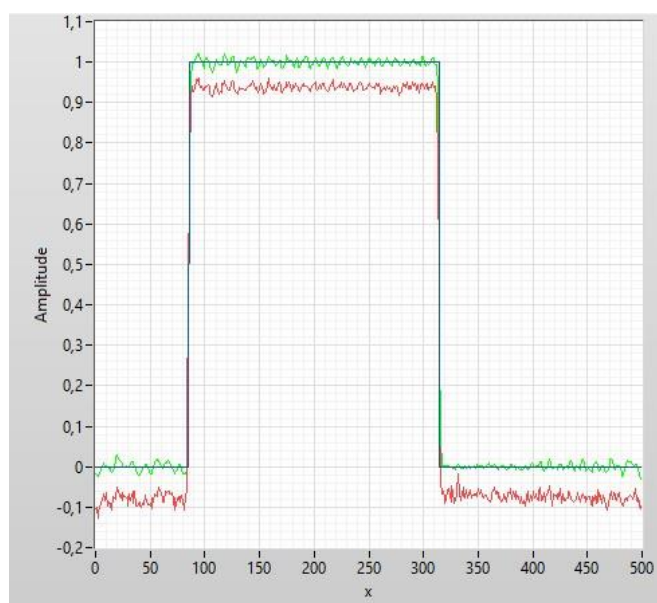
Obr. 7.2 Originální obrazec dvou kruhů a jeho sinogram



**Obr. 7.3 Rekonstrukce dvou kruhů pomocí zpětné projekce bez filtrů
(vlevo MATLAB, vpravo LabVIEW)**



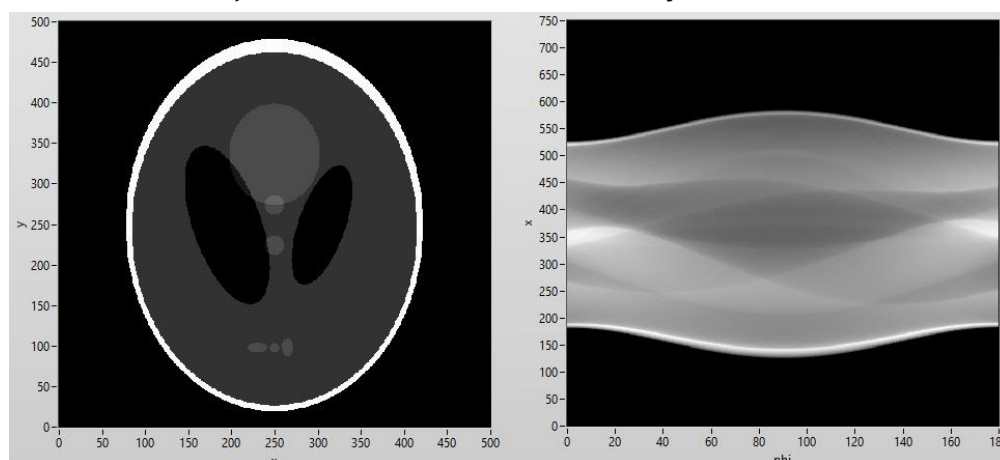
**Obr. 7.4 Rekonstrukce dvou kruhů pomocí filtrované zpětné projekce
(vlevo MATLAB, vpravo LabVIEW)**



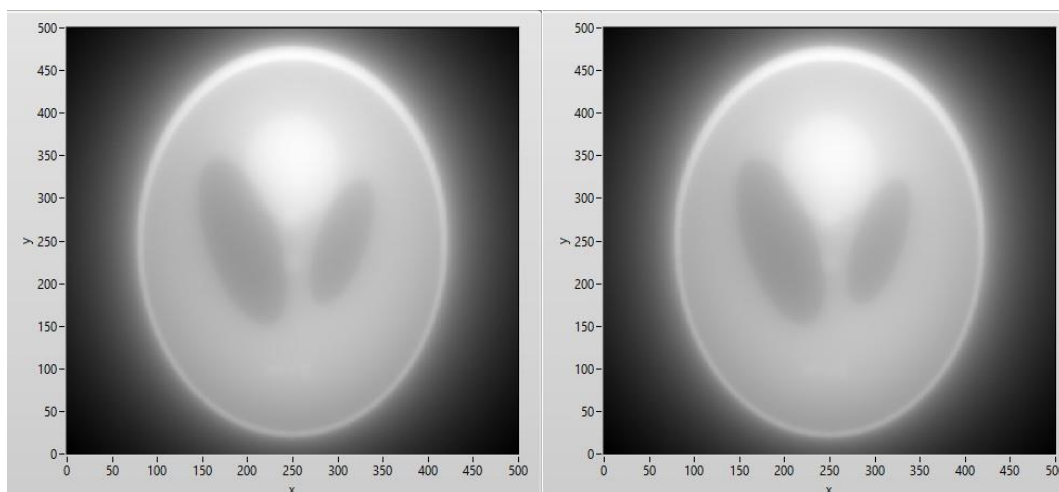
Obr. 7.5 Řez středem originálu dvou kruhů a obou rekonstrukcí získaných pomocí filtrované zpětné projekce (modře originál, zeleně MATLAB, červeně LabVIEW)

Jak je z Obr. 7.3 vidět, algoritmy bez frekvenčních filtrů mají téměř totožné výsledky, rozdíly nastávají až s aplikováním filtrace. Na Obr. 7.4 je vidět, že u verze z LabVIEW se vyskytují u vertikálních hran artefakty. Ty jsou ale tak nepatrné, že je lze zanedbat. Větší rozdíly jsou však vidět z Obr. 7.5, kdy řez rekonstrukce z programu MATLAB téměř dokonale kopíruje řez originálem. Řez rekonstrukcí z LabVIEW má ale záporný offset, který se rovná přibližně 5 % až 10 % maximální hodnoty.

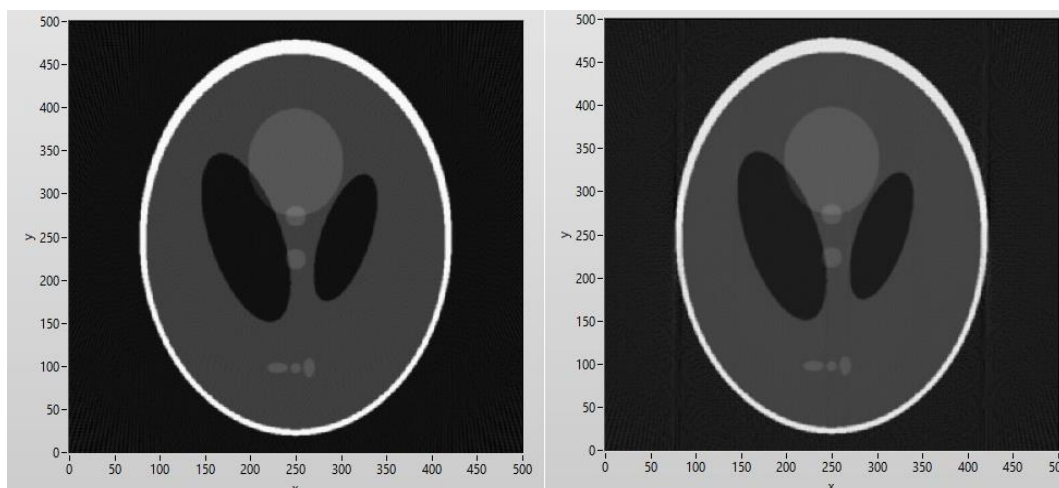
Další obrazcem určeným pro rekonstrukci byl zvolen tzv. Shepp-Loganův fantom. Tento tvar, který se skládá celkem z deseti elips, je jednoduché vygenerovat a zároveň je již dostatečně komplexní, aby otestoval schopnost algoritmu rekonstruovat složitější obrazce s množstvím rozdílných hodnot.



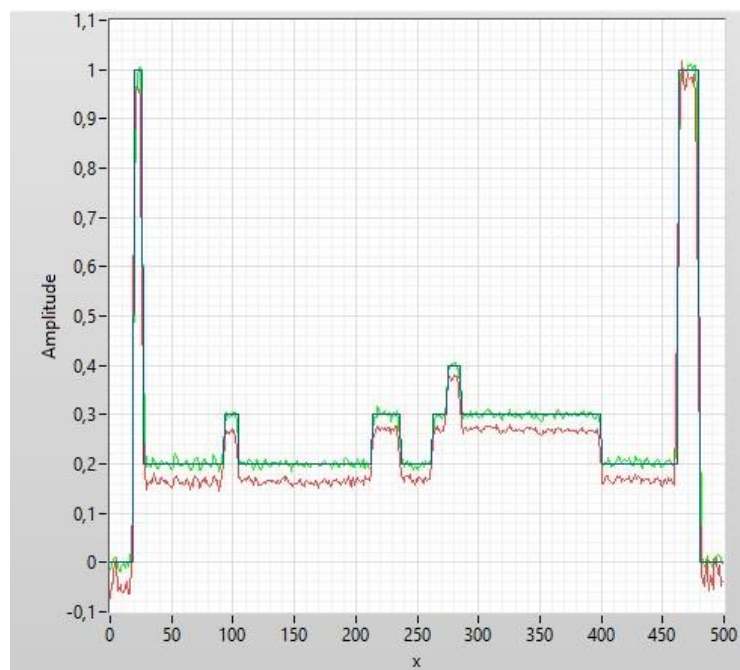
Obr. 7.6 Originální obrazec fantoma a jeho sinogram



Obr. 7.7 Rekonstrukce obrazce fantoma bez aplikovaného filtru
(vlevo MATLAB, vpravo LabVIEW)



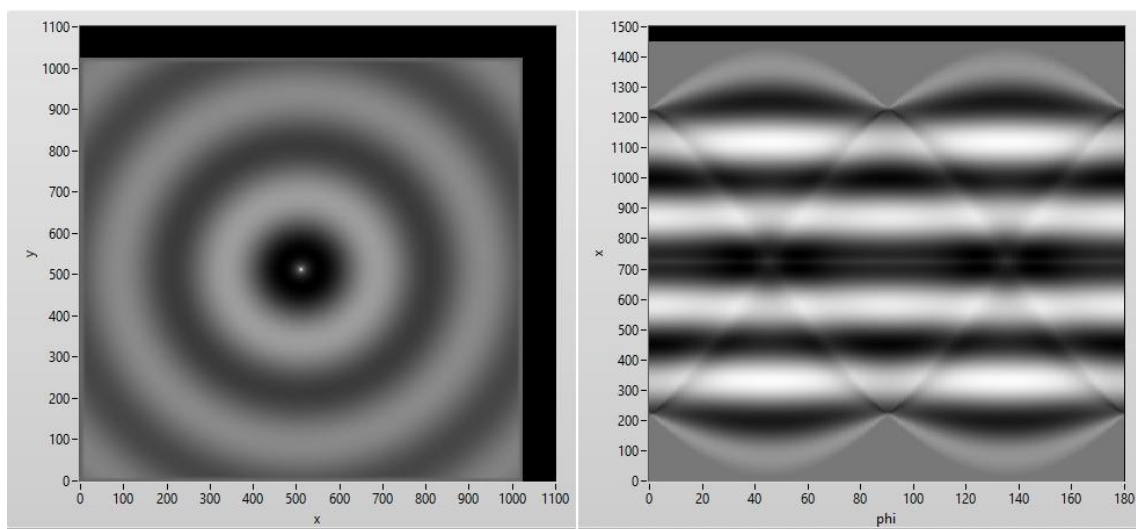
Obr. 7.8 Rekonstrukce obrazce fantoma s aplikovanými filtry
(vlevo MATLAB, vpravo LabVIEW)



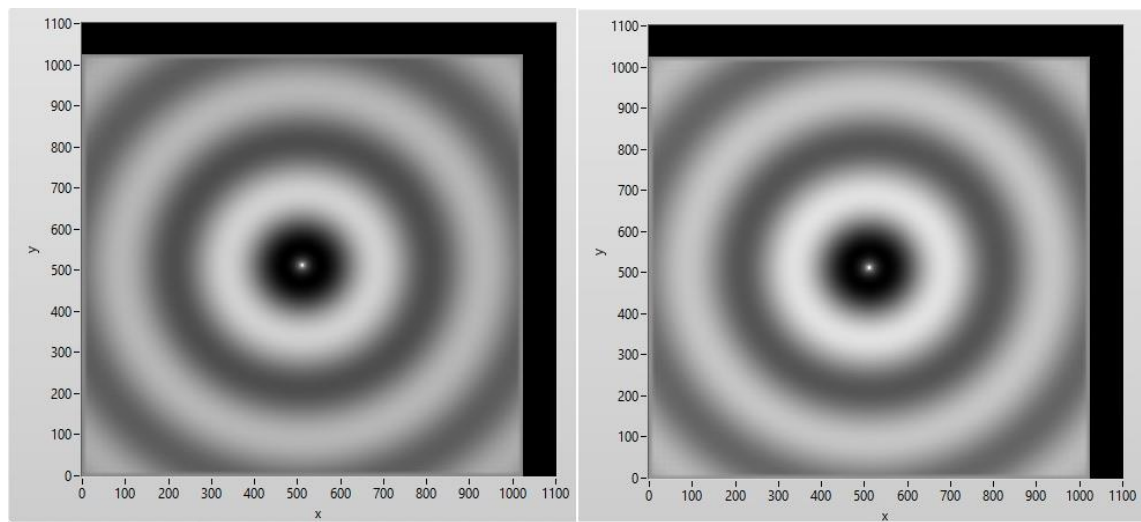
Obr. 7.9 Řez středem originálu fantoma a obou filtrovaných zpětných projekcí (modře originál, zeleně MATLAB, červeně LABVIEW)

Z Obr. 7.7 je opět vidět, že zpětné projekce bez aplikovaných frekvenčních filtrů mají téměř totožný průběh. Po aplikaci filtrů (Obr. 7.8) se ale na obrazci opět objeví u vertikálních hran nepříliš výrazné artefakty. Pro řezy středem filtrovaných zpětných projekcí, stejně jako u ubrazce dvou kruhů, platí, že projekce z programu MATLAB kopíruje průběh originálního obrazce a projekce z LabVIEW má záporný offset. Toto posunutí je ale oproti průběhu na Obr. 7.5 menší a pohybuje se přibližně mezi 2% a 5% maximální hodnoty.

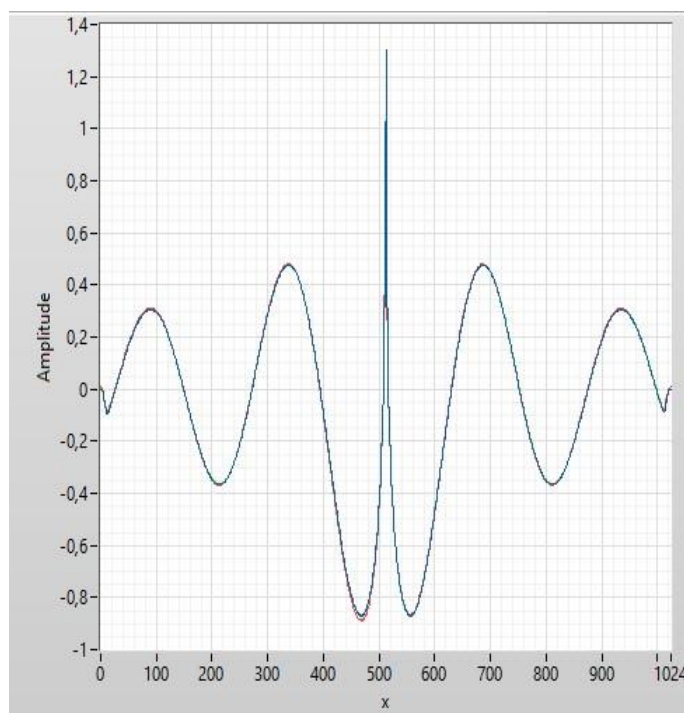
Posledním obrazcem, na kterém bude toto porovnání prováděno, je simulované šíření akustické vlny. Matice hodnot tohoto pole byla vytvořena pomocí volně dostupného modulu k-Wave [22] pro program MATLAB, který slouží pro simulaci pohybu akustických vln. Při simulaci jsou brány v potaz mimo jiné podmínky prostředí, frekvence zvuku, počet a pozice akustických zdrojů atd. Pro vytvoření obrazce byly zvoleny podmínky ideálního laboratorního prostředí, tedy teplota 25°C, tlak 100 kPa a 50% vlhkost vzduchu. Jako zdroj byl zvolen jeden monopól nacházející se ve středu obrazce, přičemž jeho frekvence (25 kHz) a zároveň čas simulace byly upraveny tak, aby akustická vlna zakrývala většinu plochy.



Obr. 7.10 Originální obrazec simulované akustické vlny a jeho sinogram



**Obr. 7.11 Akustické vlny rekonstruované pomocí filtrované zpětné projekce
(vlevo MATLAB, vpravo LabVIEW)**



Obr. 7.12 Řez středem originálu akustické vlny a obou filtrovaných zpětných projekcí (modře originál, zeleně MATLAB, červeně LABVIEW)

U tohoto obrazce již nejsou zobrazeny výsledky získané pomocí zpětných projekcí bez aplikovaných filtrů – z obou předchozích případů již je zřejmé, že jsou tyto výsledky, když už ne přesnými hodnotami, tak minimálně proporcionálně totožné. Jak je z porovnání originálu na Obr. 7.10 a rekonstrukcí z Obr. 7.11 vidět, rekonstrukce opět proběhla bez větších problémů a u obrazce získaného pomocí vytvořeného SubVI ani nejsou vidět jakékoliv artefakty. Na první pohled ale rekonstrukce mají jinou barvu. Grafy intenzity, ve kterých jsou obrazce zobrazeny, totiž ukazují pouze proporcionální hodnotu, tedy v jakém poměru jsou hodnoty matic obrazce ve vztahu k nejvyšší hodnotě, která se v matici vyskytuje. Z Obr. 7.12 je vidět, že obě dvě rekonstrukce téměř totožně kopírují řez původního obrazce a nevyskytuje se zde ani jemný šum, který se u obou rekonstrukcí u předchozích obrazců (Obr. 7.5 a Obr. 7.9) vyskytoval. Tato simulace akustické vlny je poměrně specifická skutečností, že lokace s nejvyšší hodnotou se vyskytuje v jejím přesném středu a pouze v jediném bodě, přičemž je tato hodnota přibližně dvojnásobná od hodnot, které vyskytují ve zbytku obrazce.

Z porovnání originálů obrazců a jejich rekonstrukcí pro dva kruhy, Shepp-Loganova fantoma a simulaci šíření akustické vlny lze dojít k několika závěrům. Algoritmus filtrované zpětné projekce vytvořený v programovacím prostředí LabVIEW funguje, jeho výsledky nejsou ale v určitých případech přesné. Jestliže porovnáme originální obrazce z Obr. 7.2, Obr. 7.6 a Obr. 7.10, vyjde nám, že se liší zejména ostrostí přechodů mezi hodnotami. Z porovnání řezů těchto obrazců je

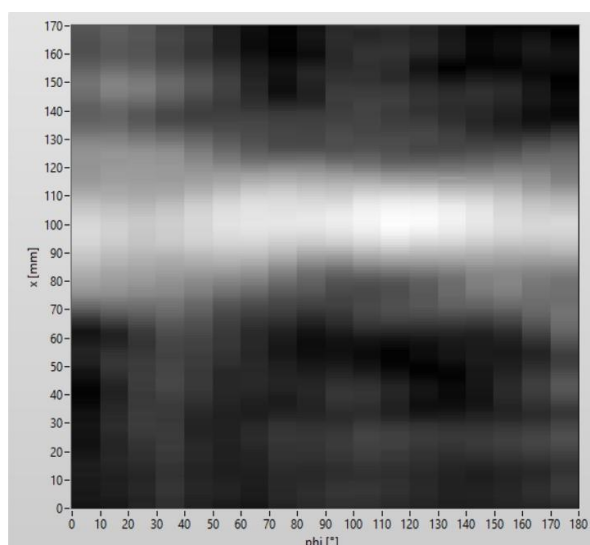
zřejmé, že vytvořený algoritmus funguje méně přesně v okamžicích, kdy probíhá rekonstrukce obrazce s binárními hodnotami 0 a 1. Jestliže se na rekonstruovaném obrazci vyskytují mezi těmito hodnotami „mezistupně“, záporný offset se začíná snižovat. Vzhledem k výsledkům rekonstrukcí lze téměř s jistotou dojít k závěru, že jsou rozdíly v rekonstrukcích z programů MATLAB a LabVIEW způsobeny rozdílným provedením frekvenční filtrace.

V [15] je uvedeno, že lze tento offset potlačit zavedením tzv. Zero paddingu. Zero padding spočívá v tom, že se po převedení průběhů do frekvenční oblasti doplní amplitudová a fázová charakteristika nulovými hodnotami tak, aby měla délku nejbližší hodnoty mocniny dvou, např. při délce charakteristik 500 jsou doplněny nulové hodnoty tak, aby měly délku 512. Jako další efekt této akce se také udává zrychlení výpočtu inverzní FFT. Po vytvoření zero paddingu však nebyly ve výsledcích zjištěny žádné rozdíly a pouze došlo k malému zpomalení celého výpočtu rekonstrukce, doplnění nulami bylo tedy opět odstraněno.

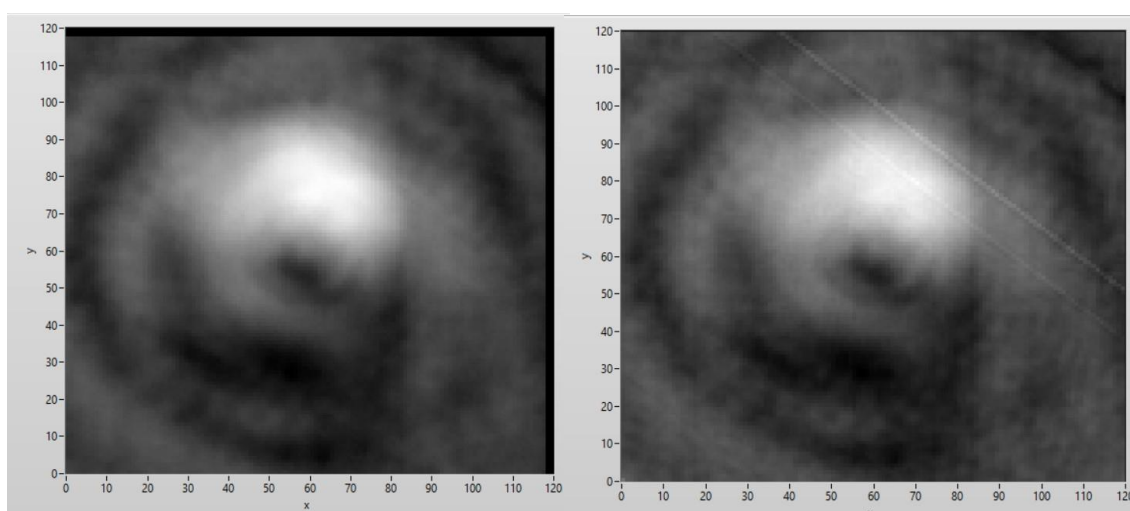
Z rekonstruovaných obrazců představujících šíření akustické vlny lze dojít k závěru, že velmi úzká lokální maxima, která mají oproti zbytku obrazce vysokou hodnotu, nedokáže zrekonstruovat ani algoritmus vytvořený v programu MATLAB. Lokální maximum, které se u obrazce nachází na pozici zdroje akustické vlny má v originálním obrazci hodnotu 1,3. Program MATLAB však tento bod rekonstruoval na hodnotu 0,76 a vytvořený algoritmus pouze na hodnotu 0,65. Jak je z řezu na Obr. 7.12 patrné, zbylé hodnoty byly ale rekonstruovány téměř dokonale. Rozdíly v maximu způsobily posun v barvách grafu intenzity a tím pádem se lze mylně domnívat, že rekonstrukce nebyly úspěšné.

Největší rezervy má tedy vytvořený algoritmus ve svých aplikovaných frekvenčních filtrech. Nepřesné hodnoty rekonstrukce jsou primárně způsobovány velmi strmými přechody mezi hodnotami, s přibývajícemi „mezistupni“ se chyba rekonstrukce stává téměř nevýznamnou. Pro účely rekonstrukce akustických polí lze ale vytvořený algoritmus prohlásit za plně funkční, velmi strmé změny by se v rekonstruovaných datech neměly vyskytovat.

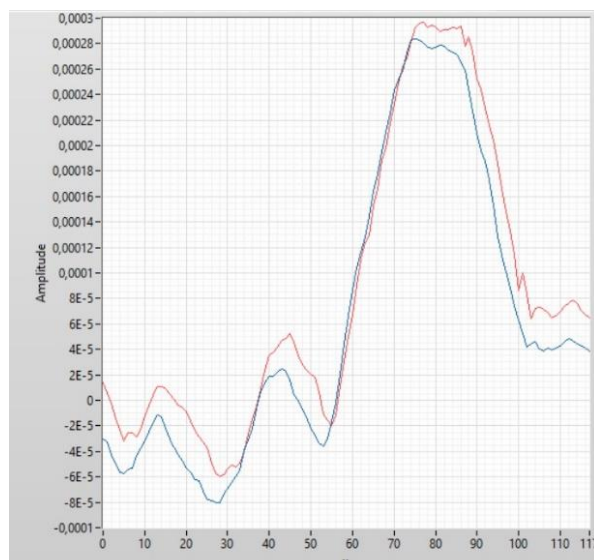
Pro demonstraci funkčnosti algoritmu při rekonstrukci z naměřených dat byla zvoleny hodnoty získané při měření monopólu vytvářejícím akustické pole o frekvenci 25 kHz, přičemž se rotační motor pohyboval v rozsahu 0° – 170° s krokem 10° a translační motor měl rozmezí 10 mm – 350 mm a krok 2 mm.



Obr. 7.13 Sinogram naměřených dat pro $f=25$ kHz, krok translace 2 mm, krok



**Obr. 7.14 Rekonstrukce obrazce pro $f=25$ kHz, krok translace 2 mm, krok rotace 10°
(vlevo LabVIEW, vpravo MATLAB)**



**Obr. 7.15 Horizontální řez středem rekonstruovaných obrazců pro $f=25$ kHz, krok translace 2 mm, krok rotace 10°
(modře LabVIEW, červeně MATLAB)**

Na Obr. 7.15 je vidět, že se na rekonstruovaných datech opět projevuje nepřesnost vytvořeného algoritmu v existenci záporného offsetu. V tomto případě je maximální hodnota rekonstrukce z programu MATLAB $3,22 \cdot 10^{-4}$, vytvořený algoritmus dává maximální hodnotu $2,91 \cdot 10^{-4}$, hodnoty jsou od sebe posunuty přibližně o 8% maximální hodnoty. Z Obr. 7.14 a Obr. 7.15 je vidět již diskutovaná skutečnost, že se algoritmy liší zejména v aplikovaných frekvenčních filtrech. Program MATLAB dokáže rekonstruovat obrazce s ostřejšími konturami. Z porovnání rekonstrukcí ale vyplývá, že se v programu MATLAB mnohem silněji projevují nepřesnosti měření a program zvýrazňuje veškeré artefakty. Na porovnání řezů je tato skutečnost vidět v okolí hodnot 90 a 100 na vodorovné ose, kde má průběh z programu MATLAB výrazné změny hodnot.

Algoritmus je tedy plně funkční, u naměřených dat se na něm ale projevuje opět chyba záporného offsetu pohybujícímu se přibližně na úrovni mezi 5 % až 10 % maximální hodnoty. Na datech je také vidět rozdílné nastavení frekvenčních filtrů, které se u algoritmu projevuje zmenšenou výrazností přechodů, zároveň jsou však mnohem lépe potlačeny nepřesnosti v měření, které se u se u rekonstrukce z programu MATLAB projevují výraznými artefakty.

7.2 Vlivy působící na kvalitu výsledných dat

Jak bylo zmíněno na konci kapitoly 3, akusto-optický jev je poměrně nevýrazný a pro bezproblémovou detekci je nutný vysoký akustický tlak. Zároveň musí být pro správné výsledky stabilní podmínky prostředí, zejména teplota a tlak. Tato kapitola se zabývá různými vlivy, které mohou naměřené hodnoty ovlivnit.

7.2.1 Vliv měřicích zařízení

Prvním vlivem ovlivňujícím naměřené výsledky jsou samotné přístroje provádějící akvizici, tedy měřicí hlavice OFV-505, dekodér OFV-5000 a měřicí karta PXI-4461.

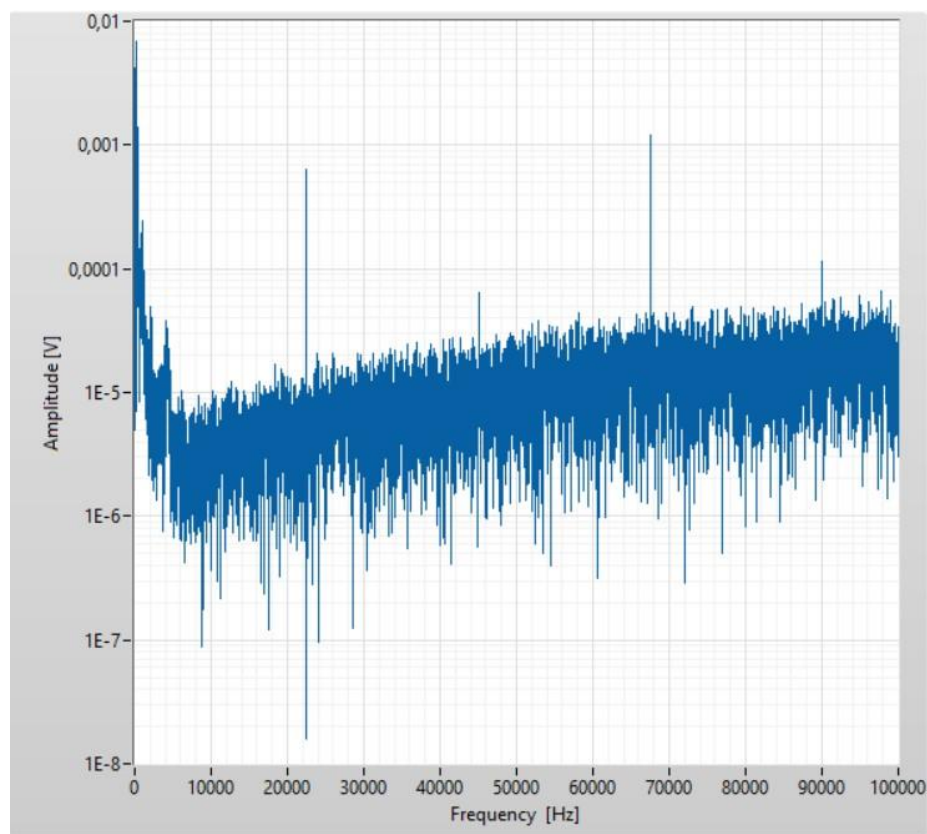
V dokumentaci hlavice vibrometru ([35]) je uvedeno, že má vzdálenost čočky od odrazné plochy pro co nejlepší výsledky odpovídat vztahu $x = 234 \text{ mm} + n * 204 \text{ mm}$; $n = 0, 1, 2, 3, \dots$. V případě použitého měřicího pracoviště je tedy doporučená vzdálenost 438 mm nebo 642 mm. Skutečná vzdálenost mezi čočkou a odrazným zrcátkem je 550 mm. Na této vzdálenosti tedy dochází k poměrně silné destruktivní interferenci. Důsledky nedodržení této podmínky byly zkoumány v [23]. Zde je uvedeno, že takto zvolená vzdálenost způsobuje, že destruktivní interference ovlivňuje sílu signálu, přičemž u intenzity dochází ke kolísání. Tato parazitní vlastnost je ale odstraněna samotným způsobem měření, konkrétněji extrakcí dat. Na signál je aplikována rychlá Fourierova transformace, ze které se použije pouze amplituda složky o zvolené frekvenci. V [23] je také uvedeno, že samotný vibrometr ukazoval nejvyšší sílu signálu i v případě, kdy právě docházelo k nejsilnější destruktivní interferenci a signál byl tedy utlumen nejvyšší měrou. Takovýto útlum se na analyzovaném průběhu neprojeví snížením měřené amplitudy složky, ale zvýšením amplitud složek šumu. Amplituda měřené složky se tedy nezmění, změní se pouze poměr signál-šum.

Další nepřesnost do měření zanáší dekodér OFV-505. U tohoto dekodéru byl pro všechna měření použit VD-06 s rozsahem 2 mm/V. Pro tento rozsah je v dokumentaci (viz Tab. 3) uvedeno, že šum dosahuje hodnot $0,05 \mu\text{m s}^{-1}/\sqrt{\text{Hz}}$. V případě vytvořeného programu je Fourierova transformace prováděna tak, že šířka pásma je 10 Hz. šum tedy dosahuje hodnot $\cong 0,158 \mu\text{m/s}$, hodnota šumu tedy na výstupu dekodéru dosahuje hodnot $\cong 79 \mu\text{V}$.

Jestliže budeme opět počítat se vzorkovací frekvencí 100 kHz, z Tab. 1 vyplývá, že měřicí karta NI PXI-4461 má přítomný šum $1,8 \mu\text{V}_{\text{rms}}$, tedy hodnotu mnohem menší, než má dekodér vibrometru. Největší příspěvek k chybě má tedy dekodér s hodnotou napětí $\cong 80 \mu\text{V}$.

7.2.2 Šum okolního prostředí

Hodnoty šumu pro jednotlivé přístroje platí pouze pro ideální prostředí, pro jejich ověření bylo provedeno měření, při kterém byl zaznamenáván signál z LDV při vypnutém manipulátoru a zdroji zvuku. Byly tedy zaznamenány hodnoty amplitud pro statické prostředí, které by při ideálních podmínkách neměly překročit hodnoty $8 * 10^{-5} \text{ V}$. Záznam byl proveden při vzorkovací frekvenci 204 kHz a době záznamu 0,1 s, šířka pásma FFT byla opět 10 Hz.

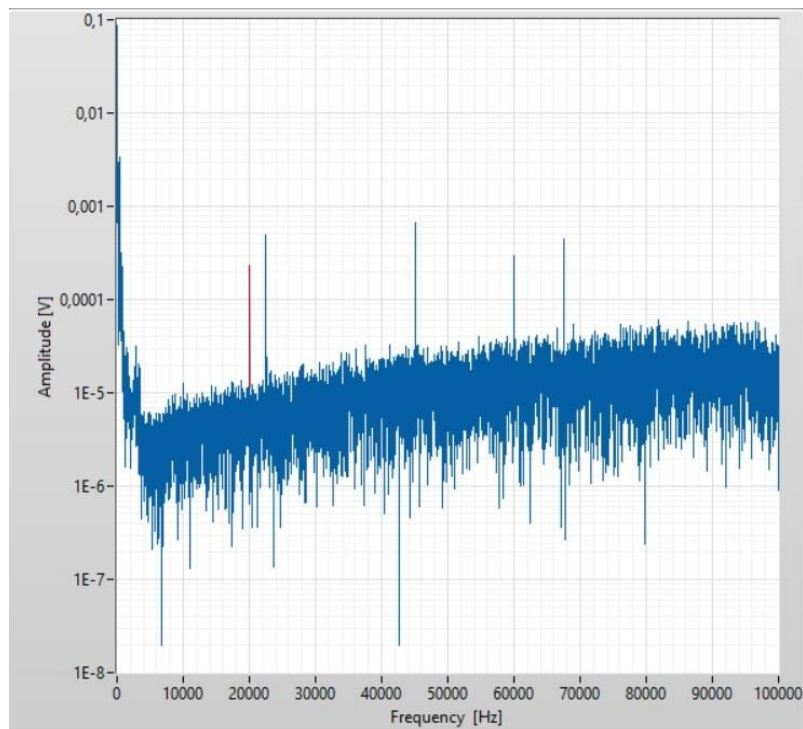


Obr. 7.16 Fourierova transformace signálu z LDV při statických podmínkách

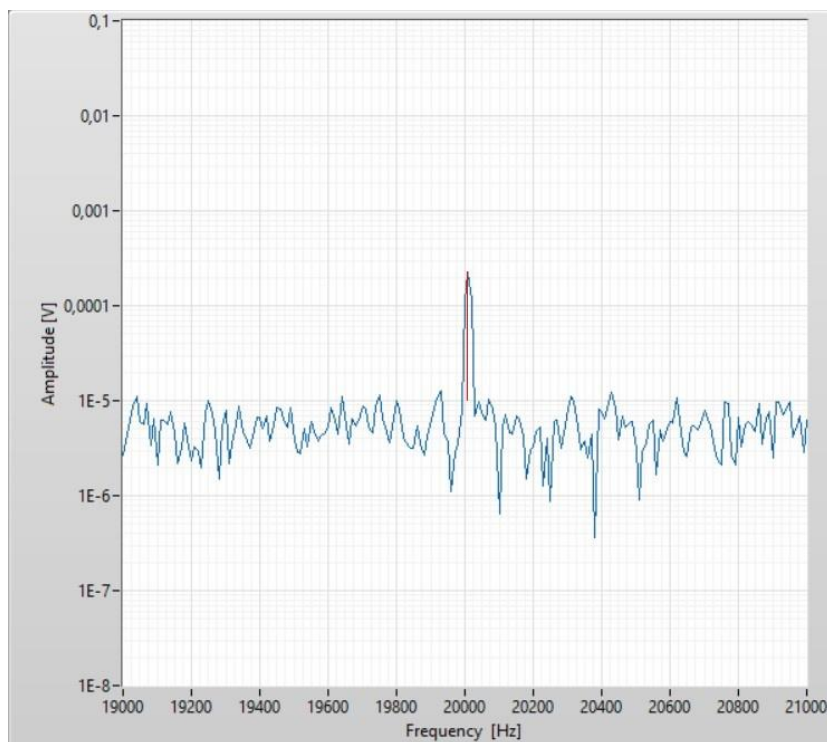
Jak je z Obr. 7.16 vidět, největší rušení je na nízkých frekvencích do 1 kHz. Další význačné rušení se objevuje na frekvencích 23,5 kHz a 67,5 kHz. Aby bylo ověřeno, že tyto vysoké hodnoty rušení nejsou způsobeny poruchou v měřicím aparátu, byla provedena další měření, při kterých byly postupně odpojovány různé součásti (tj. napřed byla změřena samotná měřicí karta, následně byl připojen dekodér, ale hlavice byla uzavřena atd.) a rušení se vyskytuje až u kompletního řetězce, kdy se laserový paprsek odráží od zrcátka. Z toho tedy vyplývá, že rušení na těchto frekvencích přichází z některého vnějšího vlivu a s největší pravděpodobností způsobuje vibrace celé konstrukce, které se poté přenášejí na odrazné zrcátko. Vzhledem k amplitudám na nízkých frekvencích a výše zmíněných kmitočtech je vidět, že je mechanismus značně citlivý na vibrace způsobené vnějšími vlivy. Zbylé frekvence dosahují hodnoty udávané dokumentací, na frekvencích mezi 10 kHz a 30 kHz se šum pohybuje dokonce přibližně o dekádu níže.

Dále bylo provedeno měření úrovně signálu pro celý rozsah translačního motoru. S monopólem buzeným sinusovým signálem o frekvenci 20 kHz a amplitudě 10 V byla zaznamenány průběhy pro rozsah translačního motoru 10 mm – 350 mm. Vzorkovací frekvence byla opět 204 kHz a doba záznamu 0,1 s. Vzdálenost mezi vrcholem reproduktoru a měřicím laserem byla 130 mm. Ze všech naměřených dat byly vybrány dva průběhy, jeden, který má amplitudu na

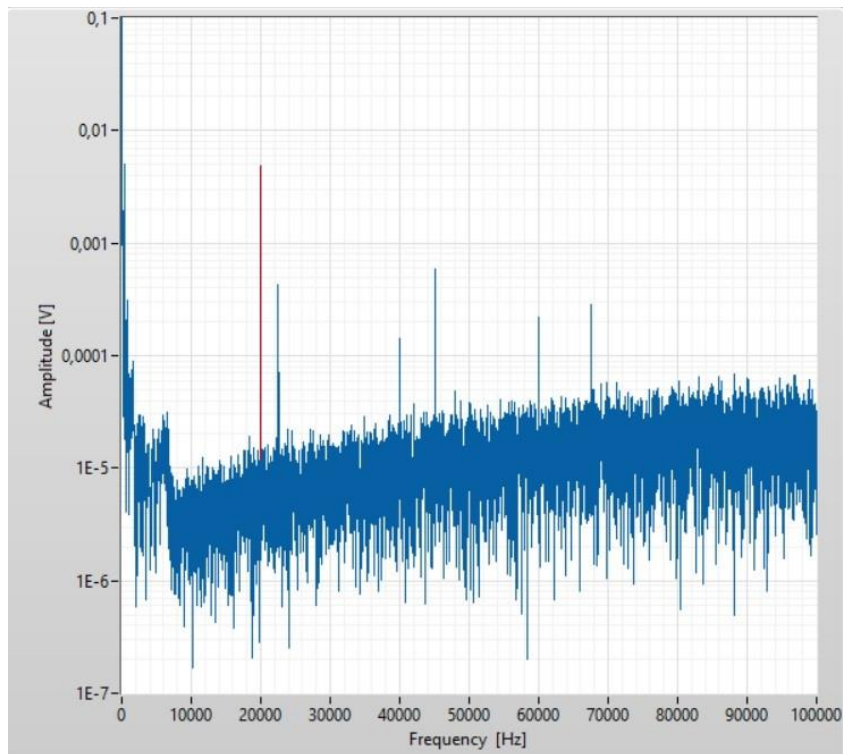
požadované frekvenci nejnižší a jeden, který ji má nejvyšší. Pro zadanou konfiguraci se tedy jedná o rozsah hodnot, u kterých lze předpokládat, že se mezi nimi budou naměřené hodnoty pohybovat. U amplitud Fourierovy transformace je červeně vyznačena hodnota, kterou program extrahuje a uloží do sinogramu.



Obr. 7.17 Minimální amplituda složky, která je extrahovaná



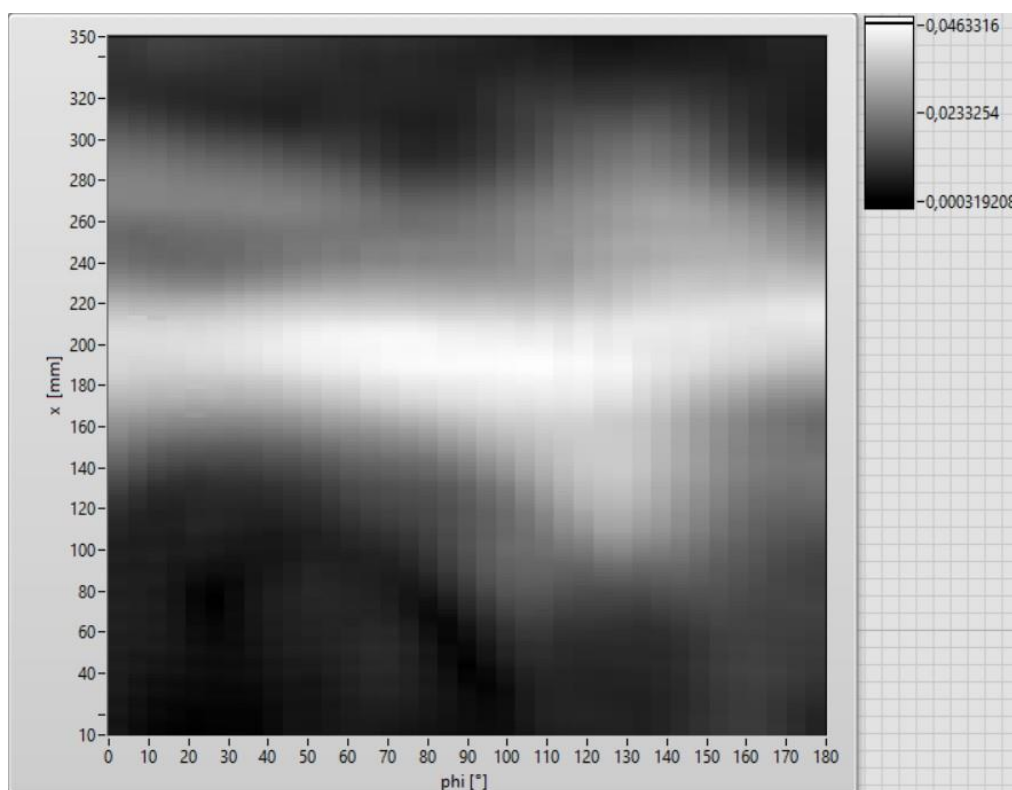
Obr. 7.18 Detail minimální amplitudy složky, která je extrahovaná



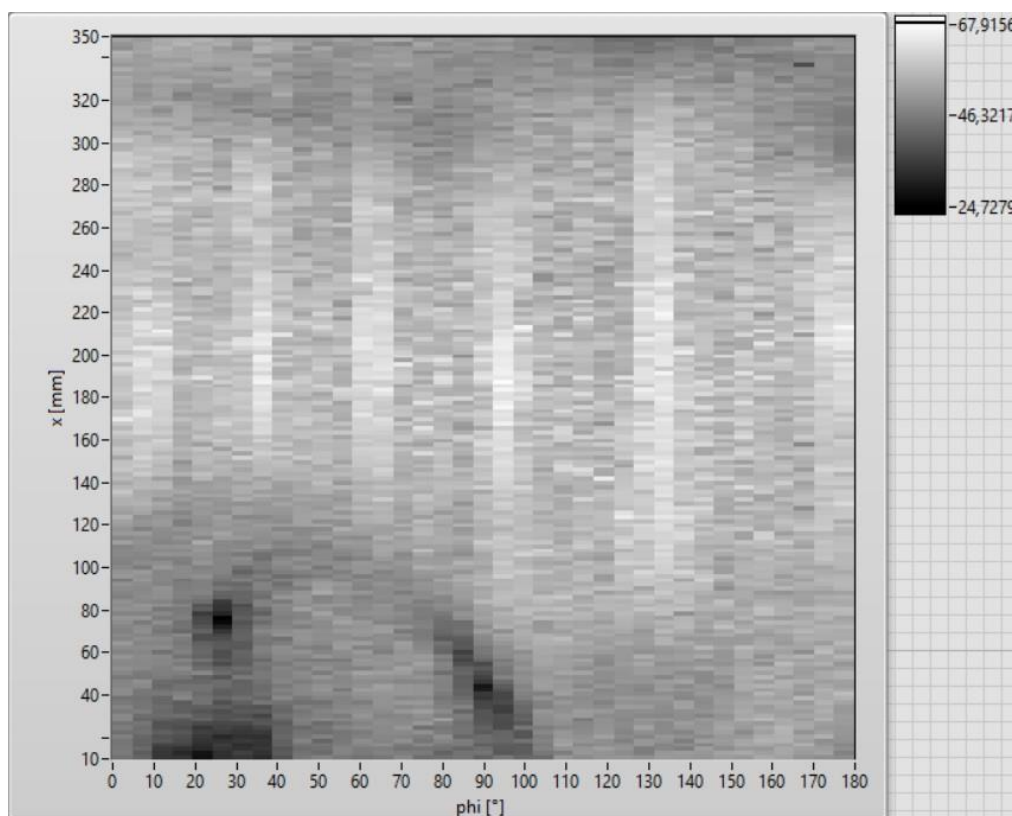
Obr. 7.19 Maximální amplituda složky, která je extrahovaná

Na Obr. 7.17 je vidět, že ukládaná hodnota amplitudy má dokonce nižší hodnotu, než je amplituda šumu na frekvenci 23,5 kHz. Z Obr. 7.18 je ale zřejmé, že při extrahování hodnoty z nejbližšího okolí zvolené frekvence tím žádná chyba nevzniká a amplituda signálu se pohybuje o dekádu výše než šum vibrometru. Maximální amplituda ostatní rušení zdaleka přesahuje, oproti nejbližší úrovni šumu má hodnotu zhruba o 2,5 dekády vyšší. Je důležité podotknout, že tyto hodnoty nelze generalizovat na všechna měření, jsou samozřejmě závislé na typu zdroje a jeho vzdálenosti od měřicího laseru, tím pádem na síle generovaného akustického pole. Měření s monopólem bylo vybráno z toho důvodu, že se reproduktor ze všech provedených měření nacházel od měřicího paprsku nejdále a ostatní zdroje se skládaly z více reproduktorů. Lze tedy předpokládat, že naměřené hodnoty budou u ostatních použitých zdrojů zvuku dosahovat vyšších maximálních hodnot.

Následně bylo proměřeno akustické pole monopólu. Pro modulaci reproduktoru byl zvolen sinusový signál s amplitudou 10 V a frekvencí 20 kHz, translační motor se pohyboval v rozmezí 10 mm - 350 mm s krokem 2 mm a rotační motor v rozmezí 0° - 180° s krokem 5°. Pro naměřená data byl vytvořen graf intenzity vyjadřující poměr signál-šum v dB. Data pro tento graf byla získána tak, že program našel nejvyšší hodnotu v nejbližším okolí naměřené amplitudy (tedy největší hodnotu šumu) a tu s naměřenou hodnotou následně porovnal.



Obr. 7.20 Sinogram naměřených dat pro monopól s frekvencí 20 kHz (jednotky ve V)



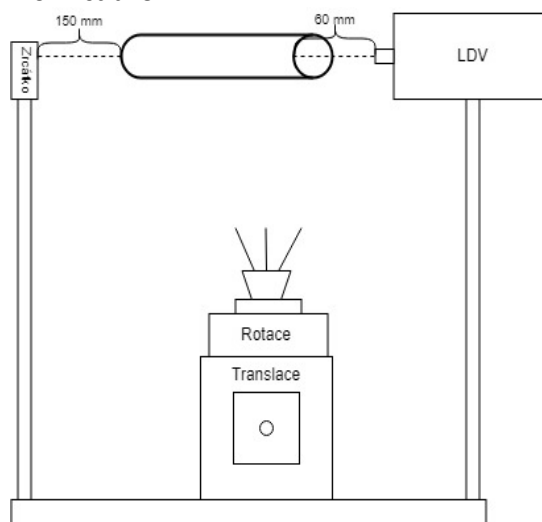
Obr. 7.21 Poměr signál-šum pro monopól s frekvencí 20 kHz (jednotky v dB)

Z Obr. 7.21 je vidět, že poměr signál-šum je pro provedené měření velmi dobrý. V nejhorším případě, tj. pro pozici natočení 30° a posuvu 10 mm má hodnotu přibližně 25 dB, většina naměřených hodnot má však 40 dB a více. Z porovnání Obr. 7.20 a Obr. 7.21 je také zřejmé, že šum má pro všechna měření přibližně stejnou hodnotu a poměr signál-šum je závislý na extrahované amplitudě.

Z dosažených výsledků lze tedy vyvodit, že z použitých měřicích přístrojů dodává k naměřeným průběhům nejvíce šumu dekodér OFV-5000 a měřicí hlavice OFV-505 kvůli nedodržení doporučené instalační vzdálenosti od odrazné plochy. Měřené amplitudy signálu však v nejhorším případě převyšují šum o jednu dekádu. Také je dokázáno, že šum je po celou dobu stabilní a poměr signál-šum je závislý primárně na hodnotě měřené amplitudy. Nejvíce problematická je vysoká citlivost na vnější vibrace, zejména kvůli ovlivnění pozice odrazného zrcátka. I když byly provedeny pokusy o co nejlepší odstínění, hodnoty složek nízkých frekvencí (cca. do 1 kHz) převyšují měřené amplitudy, také jsou velmi problematické frekvence 23,5 kHz a 67,5 kHz – při měření akustických polí frekvencí, které se od těchto hodnot liší o méně než 0,5 kHz hrozí reálné nebezpečí špatného záznamu pro pozice, u kterých je akustické pole méně výrazné.

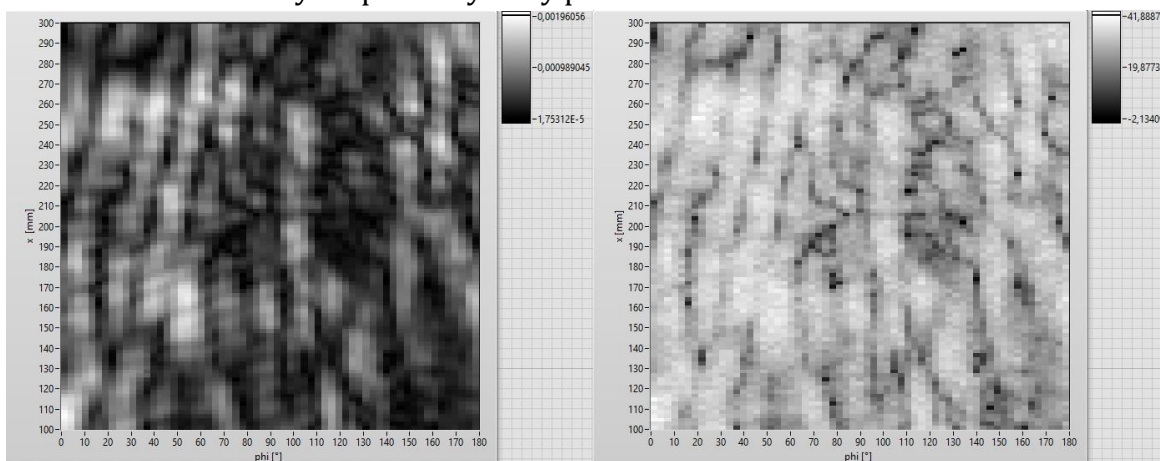
7.2.3 Vliv měřeného pole na odrazné zrcátko

Jak z dosud diskutovaných vlastností měření vyplývá, měření je citlivé na rušení. V kapitole 7.2.2 je probíráno, jakou měrou se v naměřených datech projevuje šum okolního prostředí, a to porovnáním Fourierovy transformace dat naměřených bez zapnutého zdroje zvuku a se zapnutým zdrojem zvuku. Diskutované závěry však počítají se skutečností, že samo akustické pole žádné nepřesnosti v měření nezpůsobuje. Existuje však reálná možnost, že zdroj zvuku v určitých pozicích motorů působí na odrazné zrcátko.



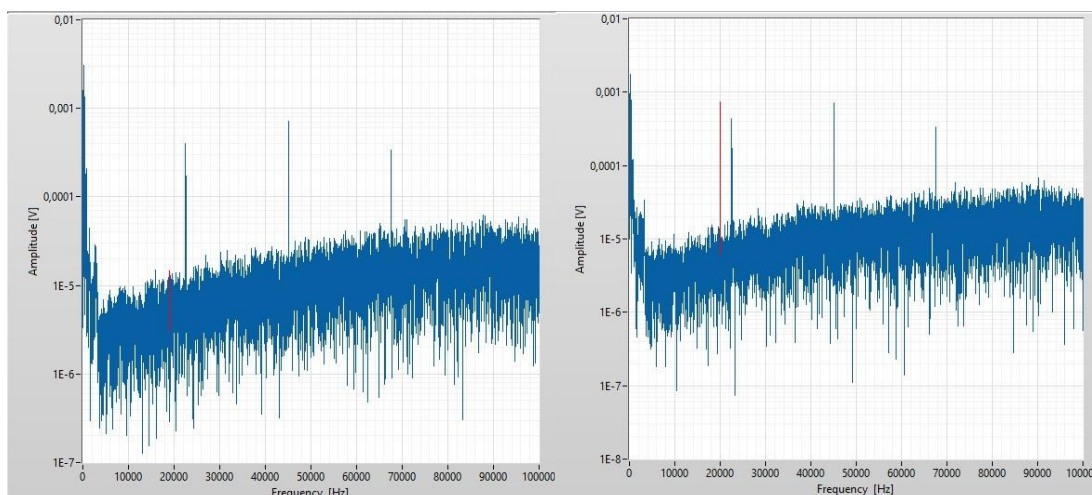
Obr. 7.22 Úprava pracoviště pro zjištění míry vibrací zrcátka způsobených akustickým polem

Pro zjištění míry, s jakou k tomuto jevu dochází, bylo měřicí pracoviště upraveno. Do komory byla instalována kovová trubička, a to tak, aby jí procházel laserový paprsek. V ideálním případě by trubička odstínila generované akustické pole a laserový vibrometr by měřil pouze vibrace samotného zrcátka. Náčrt instalace trubičky je zobrazen na Obr. 7.22, kde jsou vyznačeny vzdálenosti mezi vibrometrem, trubičkou a odrazným zrcátkem. Z mechanických důvodů musely být tyto vzdálenosti ponechány větší, mezi vibrometrem a začátkem trubičky byla mezera 60 mm, mezi trubičkou a zrcátkem 150 mm. Poté bylo provedeno měření, kdy byla zvolena frekvence 20 kHz, vzorkovací frekvence byla zvolena na hodnotu 204 kHz. Krok rotačního motoru byl zvolen 1° a krok translačního motoru byl 1 mm. V ideálním případě by se na naměřených datech nemělo zapnuté akustické pole jakkoli projevit a Fourierova transformace naměřených průběhů by měla totožnou amplitudu s daty naměřenými při statických podmínkách (viz Obr. 7.16), extrahované hodnoty amplitud by měly pouze úroveň šumu dekodéru.

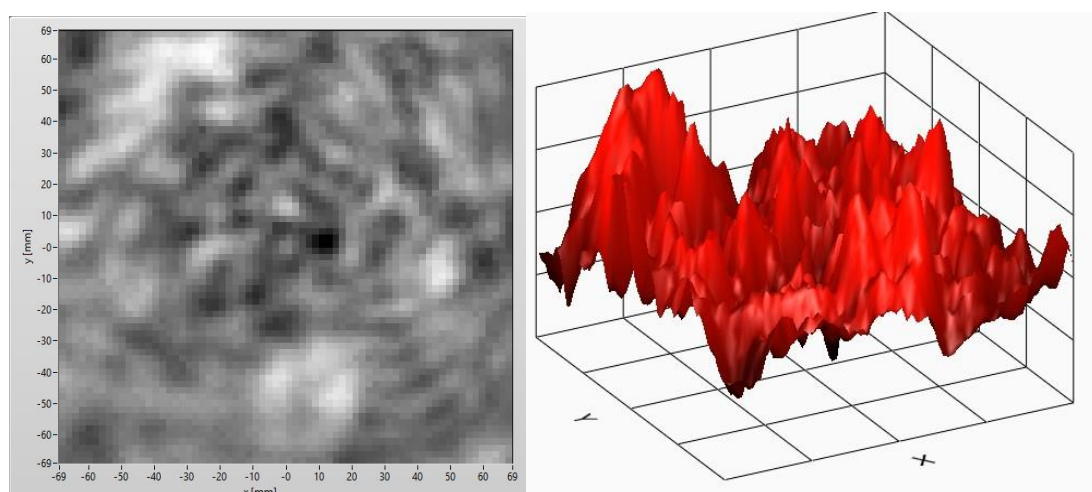


Obr. 7.23 Sinogram hodnot naměřených při potlačení akustického pole (vlevo) a jejich poměr k šumu v dB (vpravo)

Jak je z Obr. 7.23 zřejmé, v naměřených hodnotách se vliv akustického pole projevuje i při pokusech o jeho potlačení. Z pravého grafu je vidět, že poměr naměřených dat k šumu se pohybuje dokonce až na hodnotě 42 db, většina naměřených hodnot má poměr v okolí hodnoty 30 db.



Obr. 7.24 Amplitudy Fourierovy transformace pro nejnižší (vlevo) a nejvyšší (vpravo) naměřenou hodnotu



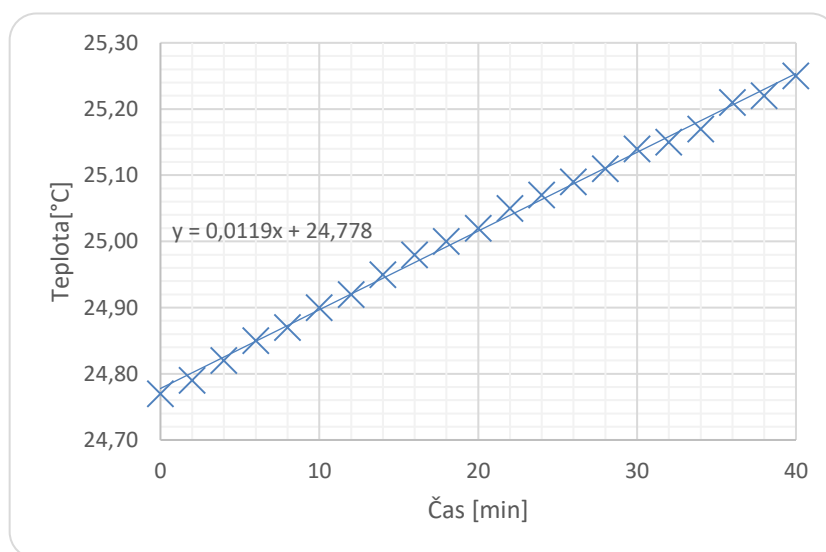
Obr. 7.25 Rekonstrukce provedená na datech naměřených při pokusu o potlačení akustické pole ve 2D i 3D grafu

Stejně informace lze vyčíst i z Obr. 7.24 – měřené amplitudy se pohybují od úrovně šumu vibrometru až po hodnotu převyšující šum o téměř dvě dekády. Nyní ale porovnejme naměřené amplitudy s hodnotami, které jsou naměřeny v případě klasického měření, tedy s minimální amplitudou z Obr. 7.17, či maximální hodnotou z Obr. 7.19. Maximální naměřená amplituda s instalovanou trubičkou se v tomto případě pohybuje přibližně půl dekády nad minimální naměřenou amplitudou za standardních podmínek, oproti maximální hodnotě za standardních podmínek je však přibližně o jednu dekádu menší. Na rekonstruovaných datech je nepříliš zřetelně vidět útlum amplitudy, který mají hodnoty v okolí středu obrazce. Jestliže se tedy akustický zdroj nacházel na úrovni trubičky, byla naměřená intenzita pole utlumená, s rostoucí vzdáleností ji vibrometr detekoval s větší měrou.

Tyto výsledky jsou s největší pravděpodobností způsobeny dvěma důvody. První spočívá v samotné konstrukci pokusu. Jak je z Obr. 7.22 vidět, část optické cesty laserového paprsku byla před vlivem akustického pole ochráněna, mezi vibrometrem, resp. zrcátkem, a trubičkou ale stále zůstává nechráněných 21 cm optické dráhy paprsku. Vibrometr tedy na své optické cestě stále provádí integraci části akustického tlaku, což se projevuje zvýšenými hodnotami na okrajích rekonstruovaného obrazce. Existuje také druhý možný důvod, a to, že akustické pole způsobuje přímo vibrace odrazného zrcátka. Tyto vibrace by mohly způsobovat lokální maxima v nejbližším okolí středu rekonstrukce. Nejvíce pravděpodobná je však kombinace obou důvodů a s tímto experimentem nelze dojít k jednoznačnému závěru. Pro přesné určení vibrací by bylo nutné změnit způsob detekce vibrací zrcátka, např. nainstalováním akcelerometru přímo na jeho zadní stranu či použitím dalšího bezdotykového vibrometru, u kterého by byl od vlivu emitovaného akustického pole zcela odstraněn (např. pomocí izolace).

7.2.4 Vliv změny teploty

Celé měření také spoléhá na skutečnost, že jsou podmínky měření po celou dobu stejné, zejména teplota a tlak. Bezodrazová komora má vnitřní šířku a délku 1,25 m a výšku 1,55 m, přičemž je zevnitř obložena velmi dobrým tepelným izolantem. Uvnitř komory se nacházejí dva po celou dobu měření napájené krokové motory a laserová měřicí hlavice. Všechny tyto komponenty, zejména hlavice laseru, jsou poměrně silné tepelné zdroje. V průběhu měření tedy dochází k neustálému oteplování vnitřního prostředí. Z tohoto důvodu bylo v uzavřené komoře provedeno pomocí teploměru Greisinger GMH 3710 20 měření teploty s časovým odstupem 2 minuty.



Graf 1 Závislost teploty bezodrazové komory na čase

Z grafu je vidět, že teplota komory roste přibližně lineárně a to rychlostí 0,012 °C za minutu. Mějme měření, které je prováděno v rozsahu úhlů 0° - 179° s krokem 1° a v rozsahu vzdáleností 100 mm – 299 mm a jedno měření trvá průměrně 0,5 s. Měření tedy probíhá 300 minut, za tuto dobu proběhne oteplení vnitřního prostoru o 3,6 °C. V [34] je uvedeno, že index lomu se řídí vztahem

$$n = 1 + (n_0 - 1) * \frac{P}{P_0} \frac{T_0}{T} \quad (35)$$

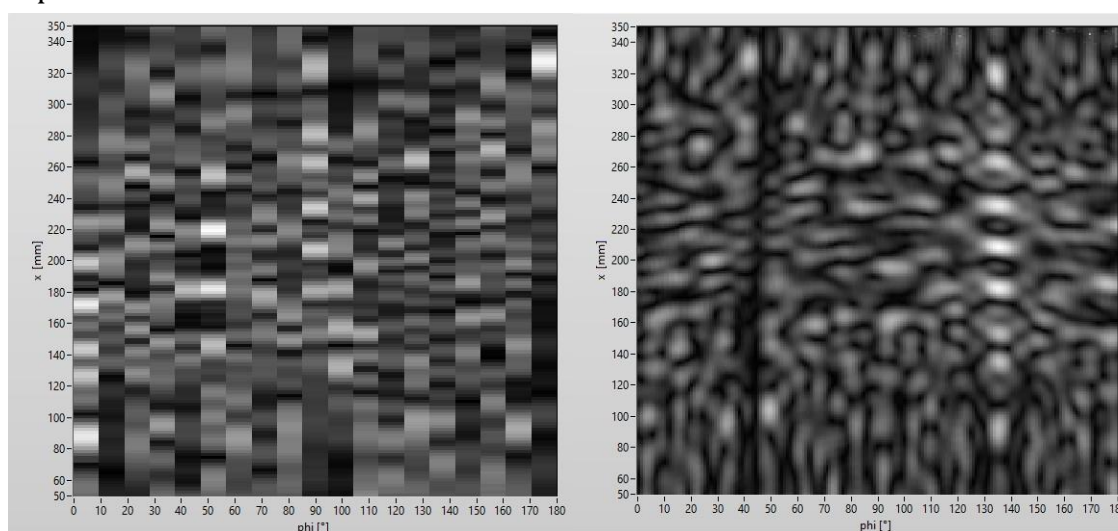
, kde je n_0 známý index lomu za tlaku P_0 a teploty T_0 ve °K. V [38] bylo nalezeno, že pro vlnovou délku 633 nm má index lomu pro standardní vzduchové prostředí s teplotou 15 °C a tlakem 101 325 Pa hodnotu 1,00027653.

Mějme tedy opět případ, kdy frekvence měření je 0,5 s a celková doba měření je 300 minut. Při začátku měření je změřeno, že je v komoře 22 °C a tlak je 110 kPa. Za jednu minutu se teplota zvedne o 0,012 °C, mezi dvěma měřeními tedy proběhne změna teploty přibližně o 10^{-4} °C. Za celé měření se teplota prostředí v komoře zvýší o 3,6 °C, na konci je tedy v komoře 25,6 °C. Po dosazení hodnot do vztahu (35) vychází, že na počátku měření mělo vnitřní prostředí bezodrazové komory index lomu $n_s \cong 1,0002931$. Jestliže předpokládáme, že v průběhu měření proběhla pouze změna teploty a tlak zůstal na své původní hodnotě, po dosazení do vztahu (35) je konečný index lomu $n_k \cong 1,0002896$ a rozdíl počátečního a konečného indexu lomu je přibližně $3,5 * 10^{-6}$. Jestliže jsou tyto hodnoty dosazeny do vztahů (12) a (3) a z těchto hodnot je vypočítán pomocí inverzní Radonovy transformace originální obrazec, jsou rozdíly způsobené změnou indexu lomu tak nepatrné, že je lze zanedbat.

7.2.5 Vliv kroku motorů

Na kvalitu rekonstruovaných dat má samozřejmě vliv jemnost kroku, se kterou je akustické pole skenováno. Program je vytvořen tak, že minimální krok motoru je vždy jedna jeho jednotka, tedy translační motor se může pohybovat minimálně po 1 mm a rotační motor po 1°.

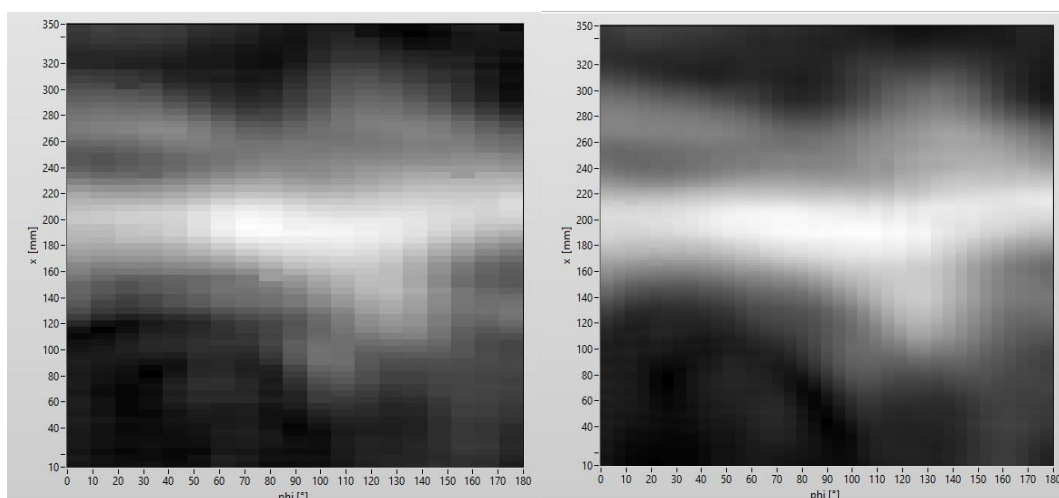
Mějme nejhorší možný případ, kdy se zdroj zvuku nachází v největší vzdálenosti od měřicího laseru, jakou manipulátor umožňuje. V tomto případě se zdroj nachází na pozici 0 mm, pro zjednodušení budeme počítat horizontální vzdálenost k laseru rovných 200 mm. Natočení zdroje o 1° způsobí posun pozice jednoho bodu akustického pole přibližně o 3,49 mm. Aby byl dodržen Shannon-Kotelnikovův teorém, může být ve standardním prostředí s rychlostí zvuku 340 m/s maximální frekvence zdroje zhruba 48 kHz. Z tohoto pohledu tedy platí, že je pro kvalitní výsledky kritičtější malý krok rotačního motoru. Změna pozice jednoho bodu vzhledem k měřicímu laseru, která je způsobená rotačním motorem, je ale závislá na vzdálenosti zdroje od laseru, a tedy na pozici translačního motoru a v průběhu měření se mění.



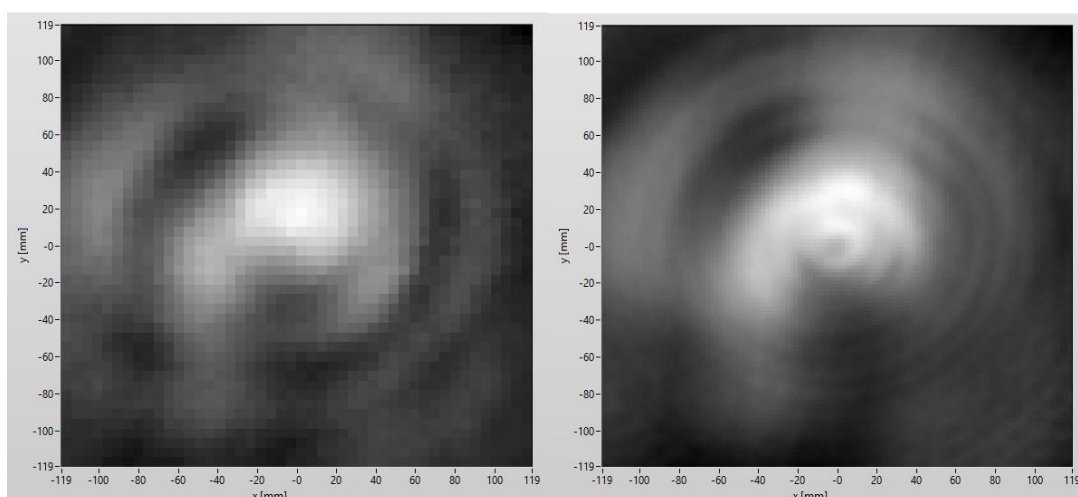
Obr. 7.26 Měření provedené s příliš velkým krokem

$f=40$ kHz, krok translace 2 mm (vlevo), 1 mm (vpravo), krok rotace 10° (vlevo), 1° (vpravo)

Na Obr. 7.26 jsou zobrazeny sinogramy dat, která byla naměřena na laboratorním přípravku s devíti zdroji za stejných podmínek, ovšem s jiným krokem motorů. Bylo měřeno akustické pole o frekvenci $f = 40$ kHz, přičemž v jednom případě byl použit krok translace 2 mm a krok rotace 10° , ve druhém případě se translace posouvala o 1 mm a rotace o 1° . Krok rotace je v prvním případě příliš velký. Jestliže se zdroj nachází v nejvzdálenějším bodě, vzdálenost posuvu jednoho bodu akustického pole vzhledem k měřicímu laseru je mezi dvěma kroky přibližně 34,8 mm. Pro standardní prostředí tedy může mít pro tento krok pole maximálně frekvenci $f \cong 4,8$ kHz. Tato skutečnost je i velmi zřetelná na samotném sinogramu. Správně změřené hodnoty (druhý případ) mají mezi hodnotami pro stejnou vzdálenost mezi dvěma kroky rotace plynulý přechod. Na Obr. 7.26 je ale vidět, že pro hodnoty mezi kroky translace dochází k výrazným změnám a sinogram není tvořen uceleným obrazcem.



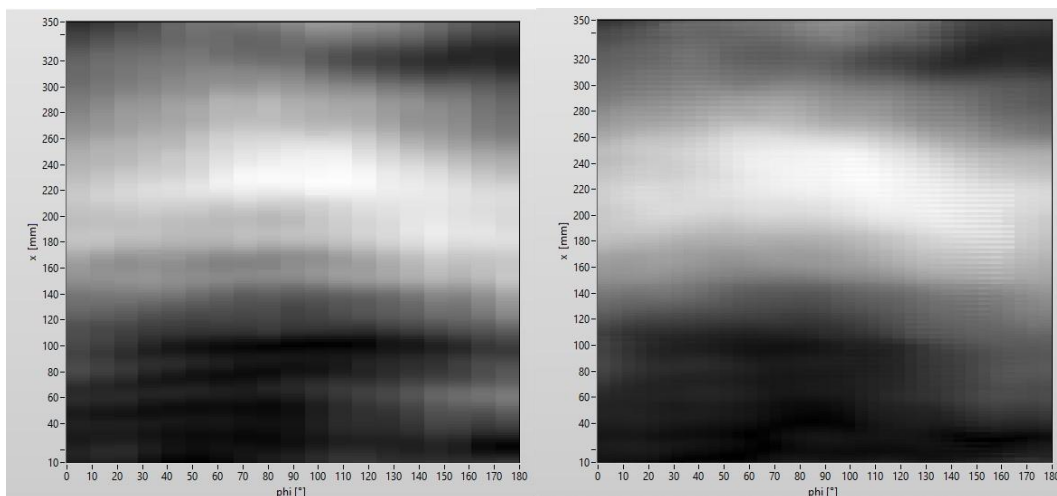
Obr. 7.27 Vliv změny kroku rotoru translace na naměřená data
 $f=20$ kHz, krok translace 5 mm (vlevo) a 2 mm (vpravo) a rotace 10° (vlevo) a 5° (vpravo)



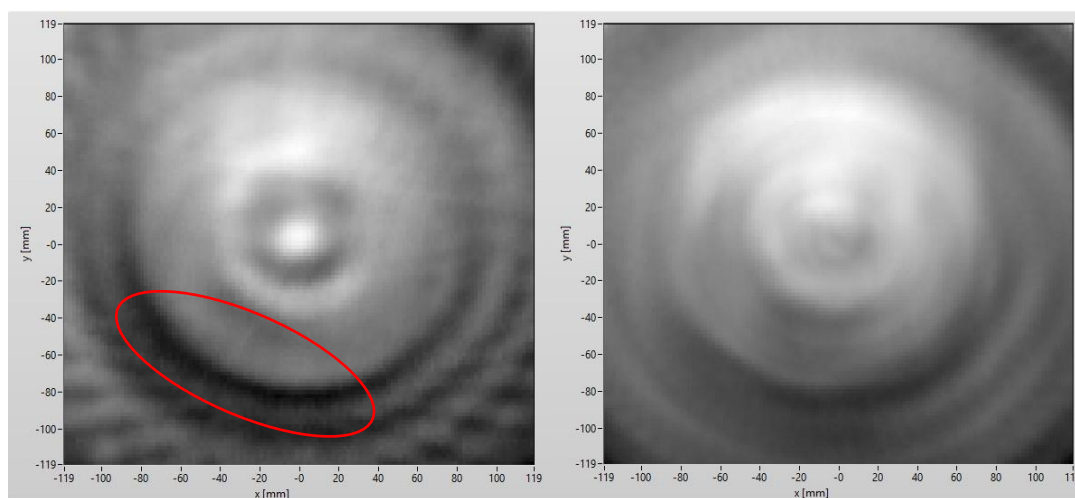
Obr. 7.28 Vliv změny kroku rotoru translace na rekonstruovaná data
 $f=20$ kHz, krok translace 5 mm (vlevo) a 2 mm (vpravo) a rotace 10° (vlevo) a 5° (vpravo)

I při dodržení výše zmíněných podmínek mají zvolené kroky motorů na rekonstrukci zásadní vliv. Na Obr. 7.27 jsou zobrazena naměřená data, která byla pořízena při různých krocích translačního motoru. Ze sinogramů je také vidět, že byly použity i jiné kroky rotačních motorů – toto má však vliv na jiný aspekt rekonstrukce a bude diskutováno v následujícím odstavci. Na sinogramech je vidět, že mají mezi sebou hodnoty na vertikální ose větší rozdíly, u pravého sinogramu jsou přechody mnohem plynulejší. Větší rozdíl ovšem spočívá v rekonstruovaných obrazcích (Obr. 7.28). Z počtu kroků translačního motoru algoritmus přímo určuje počet rekonstruovaných bodů na horizontální i vertikální ose, konkrétně podle vztahu (34). Z toho vyplývá, že jestliže je zvolen na stejném rozmezí větší počet kroků, je sníženo rozlišení rekonstruovaného obrazce, a to v poměru přibližně stejném, v jakém jsou k sobě zvolené kroky. Pro zobrazený případ, kdy byly zvoleny

kroky 2 mm a 5 mm má tedy rekonstrukce prvního zhruba 2,5krát větší rozlišení, než rekonstrukce druhého (poměry nejsou přesné, neboť se projevuje zaokrouhlování směrem dolů ve vztahu (34)).



Obr. 7.29 Vliv změny kroku rotace na naměřená data
 $f=10$ kHz, krok translace 2 mm, krok rotace 10° (vlevo) a 5° (vpravo)



Obr. 7.30 Vliv změny kroku rotace na rekonstruovaná data
 $f=10$ kHz, krok translace 2 mm, krok rotace 10° (vlevo) a 5° (vpravo)

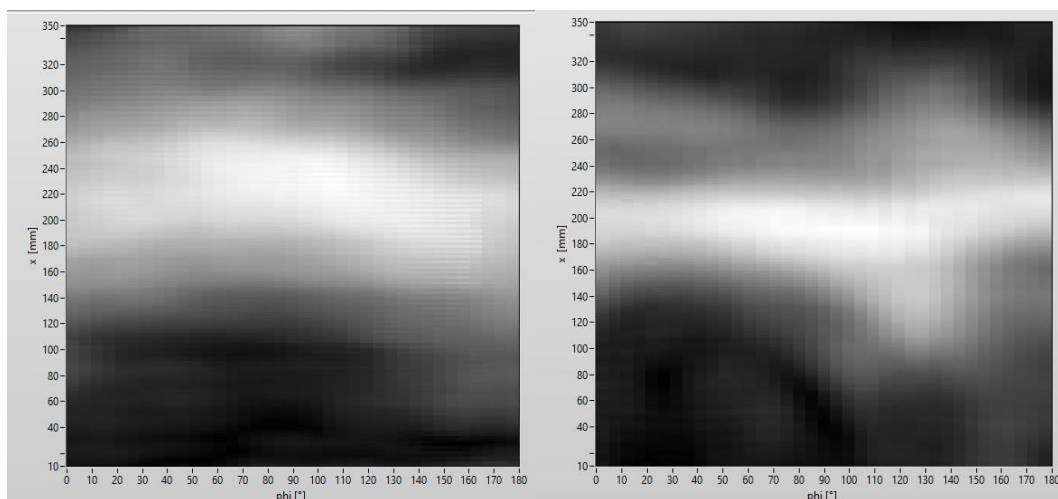
Pro demonstraci vlivu kroku rotačního motoru bylo vybráno měření prováděné na monopólu s frekvencí 10 kHz, přičemž krok translačního motoru byl nastaven na 2 mm. Pro jeden případ byl krok rotačního motoru 10° , ve druhém případě byl poloviční, tedy 5° . Na Obr. 7.30 je vidět, že se na sinogramu rozdílné kroky rotace projevily pouze zřetelnějšími přechody mezi hodnotami. Vliv na rekonstruovaný obraz je zřejmý z Obr. 7.30. Rozlišení obrazců je stejné, větší krok rotace však způsobuje viditelné artefakty – jedná se o tzv. hvězdicovitý efekt zmíněný v kapitole 4.3. Také je na Obr. 7.30 viditelný vliv na přechody mezi hodnotami na rekonstruovaných obrazcích (např. v červeně ohraničené oblasti).

Mezi jednotlivými měřeními se jednotlivé body akustického pole posouvají pro větší krok rotace po větších intervalech, hodnoty rekonstruovaného obrazce tedy mají méně úrovní.

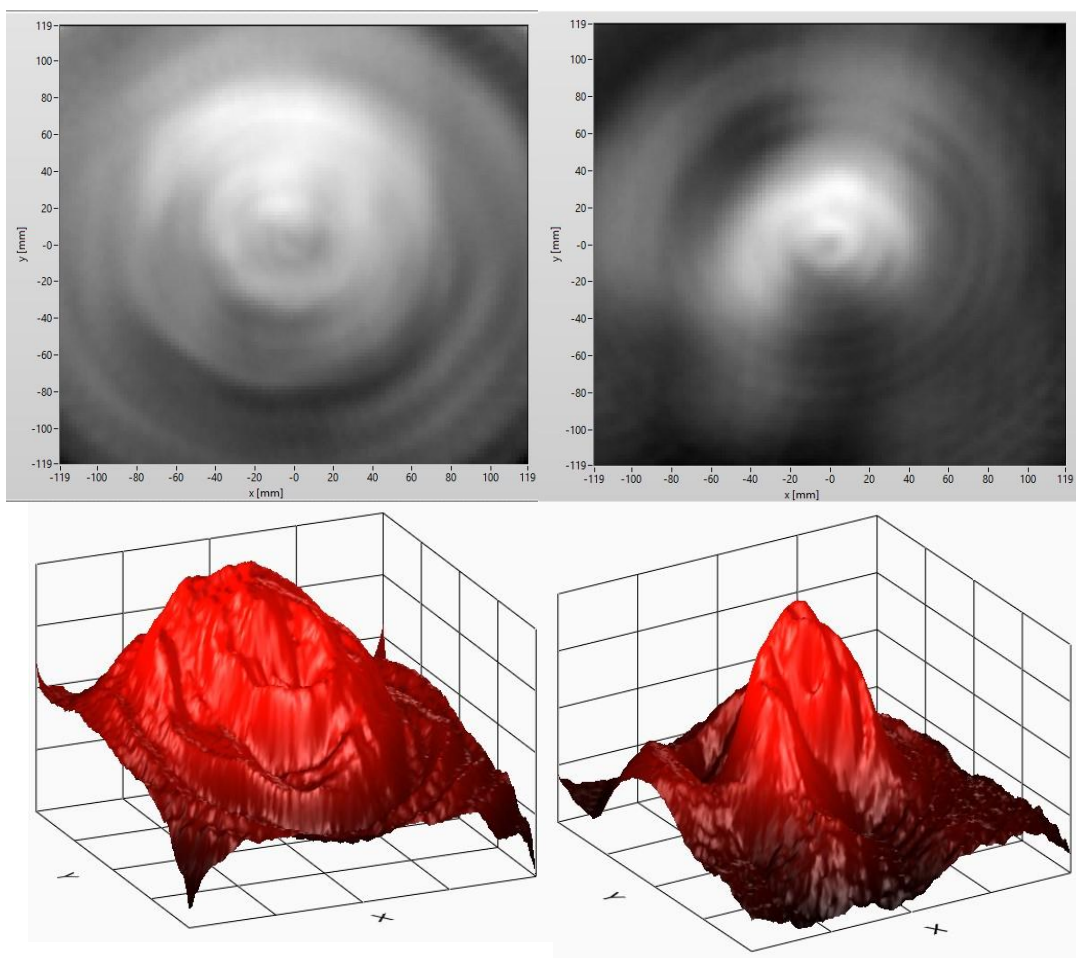
Nastavený krok motorů má na výsledky měření zásadní vliv. Minimální možný nastavitelný krok, který program umožňuje, je 1 mm, respektive 1° . Aby bylo možné dodržet Shannon-Kotelnikovův teorém, je maximální měřitelná frekvence při vzdálenosti zdroje od paprsku měření 200 mm omezena na hodnotu přibližně 48 kHz. Krok translačního motoru ovlivňuje zejména rozlišení rekonstruovaného obrazce. Krok rotace způsobuje na rekonstrukci fragmenty označované jako hvězdicový efekt a zmenšení počtu úrovní hodnot, na kterých se rekonstruované obrazce pohybují – na rekonstrukcích se vyskytují méně jemné přechody.

7.2.6 Vliv typu zdroje

Jak bylo zmíněno na začátku kapitoly 7, pro měření byly použity celkem tři typy akustických zdrojů. Na manipulátor byl ve vertikální vzdálenosti 130 mm přidělán piezoelektrický mikrofón Kemo L1010, který sloužil jako monopól s volitelnou frekvencí zvuku. Tato konfigurace byla proměřovaná nejvíce, neboť akustické pole monopólu bylo jednoduché a pro kvalitní výsledky nebylo potřeba volit velmi jemný krok, díky čemuž jednotlivá měření probíhala oproti důkladnému skenování značně kratší dobu.

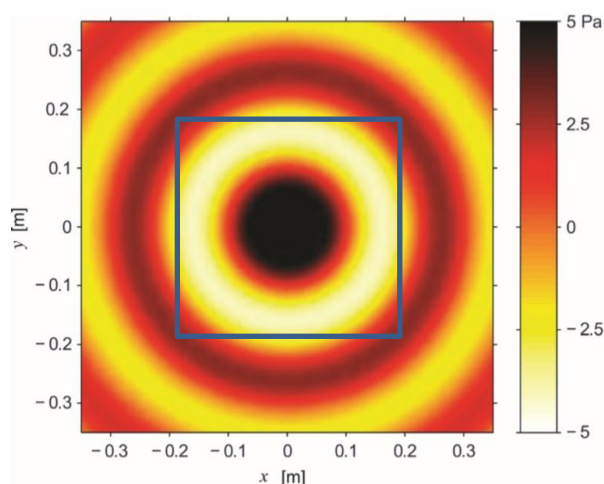


Obr. 7.31 Rozdíl sinogramů pro $f=10$ kHz (vlevo) a $f=20$ kHz (vpravo)



Obr. 7.32 Rekonstrukce akustických tlaků pro $f=10$ kHz (vlevo) a $f=20$ kHz (vpravo)

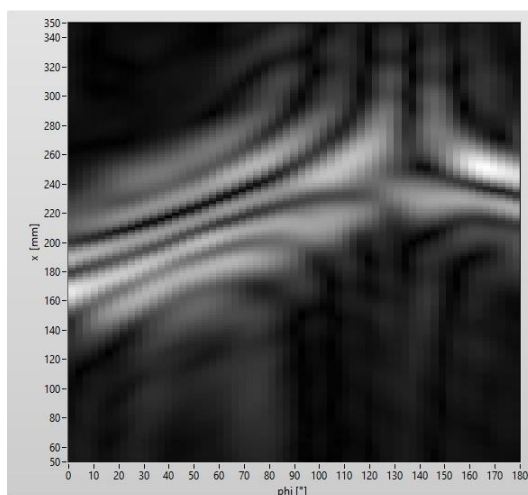
Na případu monopólu lze také demonstrovat vliv naměřených dat na zvolené frekvenci. Pro obě měření, jejichž výsledky jsou na Obr. 7.32, byl použit krok rotačního motoru 5° a krok translačního motoru 2 mm. Pro obě tyto frekvence se naměřená i rekonstruovaná data mění postupně, nejsou zde žádné ostré přechody. Podle očekávání se se zvyšující se frekvencí průměr středu s maximální hodnotou akustického tlaku zmenšuje.



Obr. 7.33 Naměřené rozložení akustické pole o frekvenci 2 kHz 120 mm nad zdrojem [1]

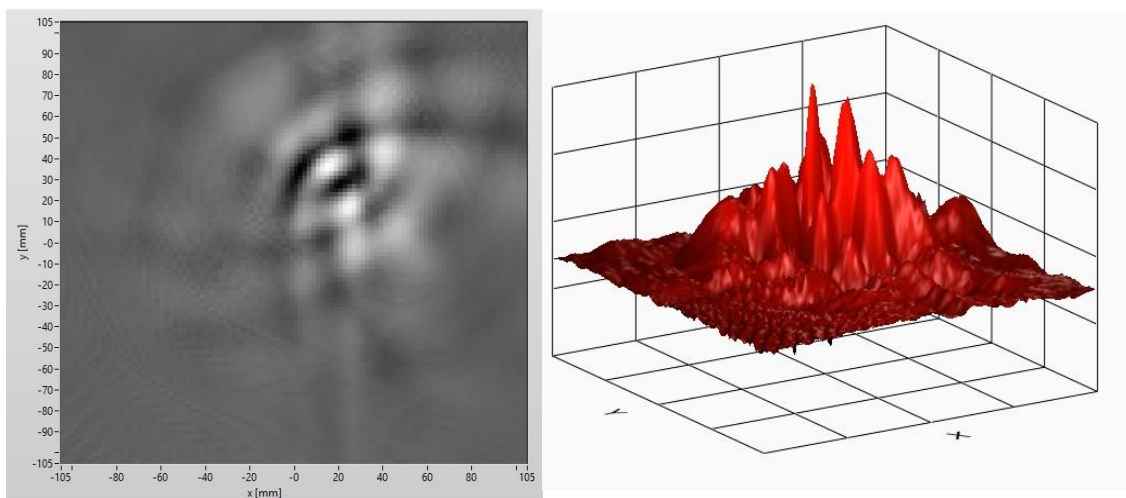
Na těchto naměřených datech se projevuje další omezení vytvořeného měřicího zařízení, a to je rozsah translačního motoru. Pro měření byly zvoleny téměř největší rozsah posun, jakého je možné dosáhnout – od koncových spínačů byl posun zastaven pouhých 10 mm. I tak ale většinu plochy rekonstruovaných obrazců zabírá středové maximum tlaku, dále je už pouze zobrazena část, kdy tlak klesá k prvnímu minimu. U měření pro 10 kHz je dokonce možné, že minimum ani není zobrazeno. V [1] bylo prováděno měření rozložení tlaku akustického pole. Na Obr. 7.33 je zobrazen výsledek měření rozložení akustického tlaku nacházejícího se 120 mm nad monopólem generující pole o frekvenci 2 kHz. Do tohoto obrázku byl přidán modrý obdélník, který přibližně označuje, jakou plochu dokáže vytvořený měřicí řetězec naskenovat a rekonstruovat. V porovnání s použitým reproduktorem Kemo L010 měl akustický zdroj v [1] pravděpodobně užší úhel vyzařování, neboť modrým obdélníkem vyznačená oblast přibližně odpovídá naměřeným datům při frekvenci 10 kHz.

Následně byl 55 mm pod úroveň laserového paprsku nainstalován akustický dipól (opět s volitelnou frekvencí), který se skládal ze dvou piezoelektrických mikrofónů stejného typu, přičemž se středy mikrofónů od sebe nacházely ve vzdálenosti 60 mm. Mikrofony byly propojeny tak, aby vysílaly vždy v protifázi.



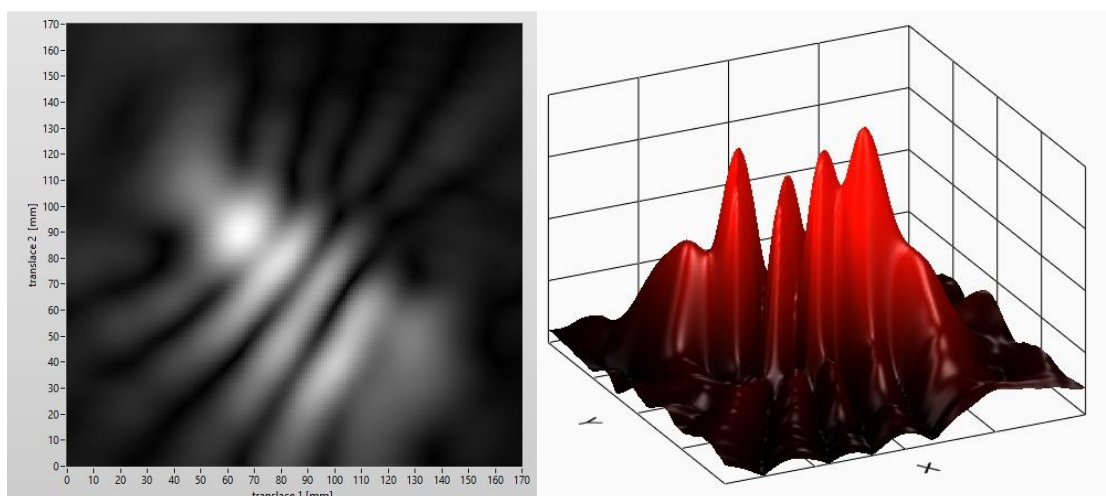
Obr. 7.34 Sinogram naměřených dat pro $f=20$ kHz, krok translace 2 mm, krok rotace 3°

Pro měření akustického pole byla vybrána frekvence 20 kHz a krok rotace 1° a krok translace 1 mm. V porovnání s naměřenými sinogramy pro případ jednoho monopólu (Obr. 7.31) má pole generované dipólem složitější rozložení tlaku. Hodnoty v sinogramu na sebe však stále plynule navazují a pro měření byl zvolen dostatečně jemný krok.

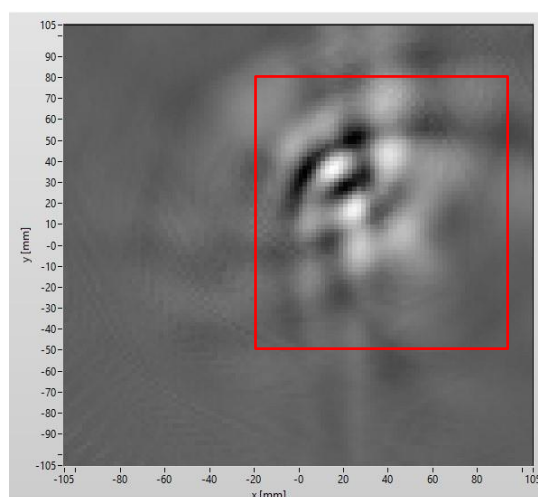


Obr. 7.35 Rekonstrukce naměřených dat pro $f=20$ kHz, krok translace 2 mm, krok rotace 3°

Rekonstruovaná data však očekávaným výsledkům příliš neodpovídají. Z tohoto důvodu bylo lehce pozměněno měřicí pracoviště a provedeny úpravy řídicího programu. Na úroveň laserového paprsku byl přidán vysokofrekvenční mikrofón G.R.A.S 46DE, který je určený pro měření až do frekvencí 140 kHz. Následně byl upraven program tak, aby byla postupně měněna pozice obou translačních motorů a pro každou pozici byla zaznamenána hodnota akustického tlaku naměřená mikrofónem. Jako krok pro oba translační motory byla zvolena vzdálenost 1 mm.



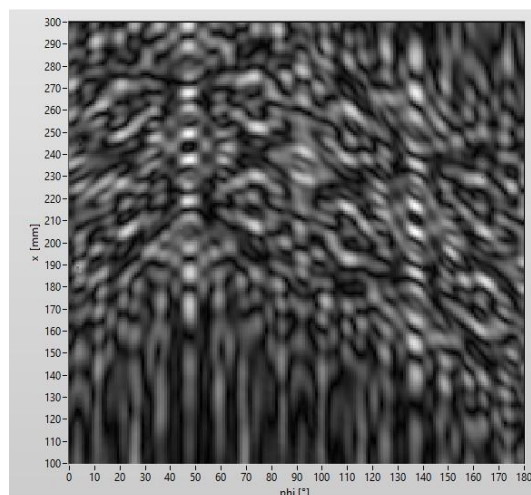
Obr. 7.36 Hodnoty akustického tlaku dipólu pro $f=20$ kHz změřené mikrofonom G.R.A.S 46DE



Obr. 7.37 Rekonstrukce naměřených dat pro $f=20$ kHz, krok translace 2 mm, krok rotace 3°

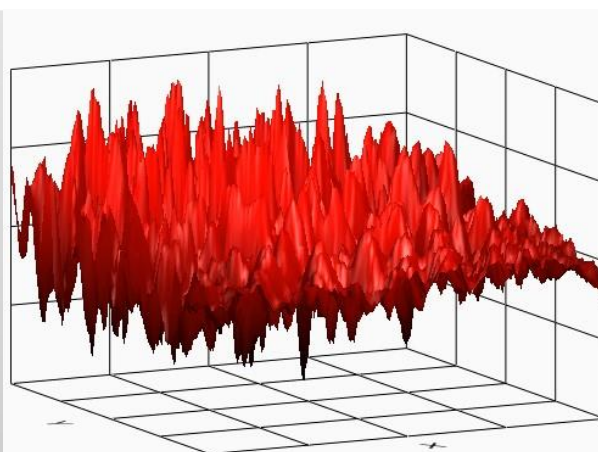
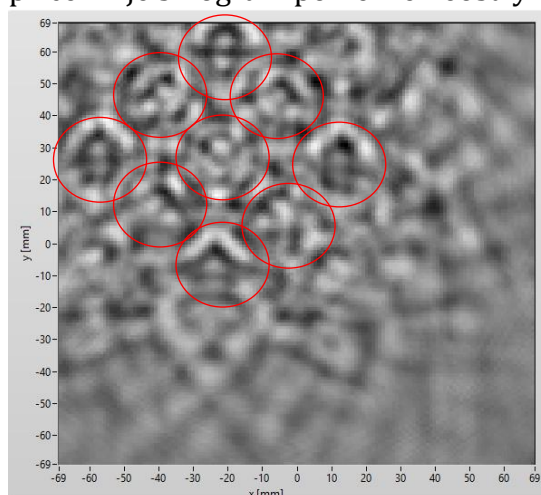
Při porovnání rekonstrukce s naměřenými daty je zřejmé, že metoda bezdotykového měření akustického pole pomocí LDV není schopná akustické pole proměřit s akceptovatelnou přesností. Červeně ohraničená oblast na Obr. 7.37 se sice naměřeným datům na Obr. 7.36 podobá, rozdíly v rekonstrukci a přesnosti (zejména v oblasti interferencí mezi reproduktory) jsou ale velmi výrazné.

Nakonec byl 48 mm pod úroveň laserového paprsku nainstalován laboratorní přípravek, na kterém bylo přiděláno devět ultrazvukových zdrojů, které se od sebe nacházely ve vzdálenosti 5 mm a které vysílaly ve fázi. Jejich frekvence byla pevně určena na hodnotu 40 kHz. Tato frekvence se již přibližuje maximální hodnotě, která je určena nejmenším možným krokem rotačního motoru, tedy 48 kHz.



Obr. 7.38 Sinogram naměřených dat lab. přípravku s krokem translace 1 mm a rotace 1°

Již ze sinogramu na Obr. 7.38 je zřejmé, že se přípravek svým generovaným akustickým polem přibližuje limitům, které měřicí řetězec má. Přechody mezi hodnotami jsou plynulé, naměřené amplitudy signálu se však velmi často střídají, přičemž je sinogram poměrně neostrý.



Obr. 7.39 Rekonstruovaný obrazec lab. přípravku s krokem translace 1 mm a rotace 1°

Na rekonstruovaných datech na Obr. 7.39 je laboratorní přípravek nezřetelně viditelný, jednotlivé zdroje jsou označeny červenými kružnicemi. Zobrazením rekonstrukce do 3D grafu však vyvstane poměrně výrazně skutečnost, že jsou data velmi silně zašuměná a nepříliš zřetelná.

Porovnáním naměřených dat ze všech tří použitých přípravků bylo tedy dosaženo několika závěrů. Minimální frekvence, kterou je smysluplné měřit, je omezena délkou posuvu translačního motoru, pro použitý monopól je na frekvenci 10 kHz proměřeno pouze první maximum tlaku, přičemž první minimum není ani pravděpodobně dosaženo. Pro jiné konfigurace je tento kmitočet samozřejmě rozdílný, silně záleží i na vyzařovacím úhlu zdroje a na jeho vertikální vzdálenosti

od měřicího paprsku. Problematické výsledky nastávají u měření složitějších akustických polí generovaných více akustickými zdroji. I podle vzhledu sinogramů je možné říci, že k měření byly zvoleny kroky tak, aby nedošlo k podvzorkování pole. U dipólu ale rekonstrukcí vznikl značně nezřetelný a nepřiliš detailní obrazec, zejména když byl porovnán s daty získanými proměřením stejného akustického pole pomocí mikrofону. U dat získaných z měření laboratorního přípravku byl získán obrazec, na kterém bylo viditelných všech devět zdrojů, hodnoty však po zobrazení v 3D grafu byly velmi nezřetelné a opět lze říci, že naměřené akustické pole nedosáhlo požadovaných kvalit. Měřicí řetězec tedy dokáže věrně a kvalitně zjistit rozložení akustického tlaku jednoho monopólu. Pro složitější pole, které je generováno více zdroji a které má větší množství složitěji se střídajících hodnot, je pro pracoviště nutno provést ještě další úpravy, zejména umožnit zvolení menšího kroku motorů.

7.2.7 Zhodnocení vlivů působících na kvalitu dat

V kapitole 7.2 jsou vyhodnoceny různé aspekty, které mohou ovlivňovat výslednou kvalitu měřených a rekonstruovaných dat. Nejdříve je rozebrán vliv samotných měřicích zařízení, tedy laserového Dopplerova vibrometru (skládajícího se z měřicí hlavičky Polytec OFV-505 a dekodéru Polytec OFV-5000) a z měřicí karty NI PXI-4461. Větší možný vliv na naměřené hodnoty by mohlo mít umístění měřicí hlavičky ve vzdálenosti od odrazného zrcátka, která není doporučena v dokumentaci k tomuto výrobku. Dále se na dekodéru podle katalogových hodnot (a vzhledem k použité Fourierově transformaci) objevuje úroveň šumu $\cong 8 \cdot 10^{-5} V$. Vzhledem k míře, jakou jsou měřená data závislá na ostatních zdrojích chyb, lze prohlásit, že měřicí přístroje výsledná naměřená data téměř neovlivňují.

Dalším vlivem ovlivňující naměřené hodnoty jsou zdroje vibrací z okolního prostředí. Z naměřených průběhů bylo určeno, že významné rušení je na nízkých frekvencích do 1 kHz, dále na 23,5 kHz a 67,5 kHz. Pro ostatní frekvence se úroveň rušení pohybuje na hodnotách šumu dekodéru vibrometru, přičemž mají naměřené amplitudy signálu od těchto hodnot odstup od 20 dB do 60 dB. Rušení na frekvencích 23,5 kHz a 67,5 kHz je však tak významné, že se amplitudy pohybují na úrovni měřených signálů a měření ve velmi blízkém okolí těchto hodnot (zhruba $\pm 0,5$ kHz) by těmito hodnotami mohlo být ovlivněno.

Dále bylo měřicí pracoviště upraveno, aby byl detekován vliv akustického pole na vibrace samotného odrazného zrcátka. Na optickou dráhu laserového paprsku byla přidána trubička, která měla zabránit interakci pole s prostředím, kterým paprsek prochází. Z mechanických důvodů musely být mezi vibrometrem a trubičkou a trubičkou a odrazným zrcátkem ponechány větší mezery. Po proměření akustického pole s touto konfigurací bylo dosaženo závěru, že měření je

neprůkazné. Na měřené frekvenci byly pro většinu pozic naměřeny amplitudy signálu přibližně o jednu dekádu převyšující hodnoty šumu. Nelze ale průkazně určit, jestli naměřené hodnoty vypovídají o vibracích zrcátka či bylo naměřeno akustické pole v mezerách po stranách trubičky – s největší pravděpodobností se jedná o kombinaci obou faktorů. Pro přesné určení vibrací odrazné plochy by bylo třeba provést úpravu celé konfigurace, např. instalováním akcelerometru či použitím dalšího bezdotykového vibrometru, u kterého by byl např. pomocí izolace úplně odstraněn vliv emitovaného akustického pole.

Vzhledem k menším vnitřním rozměrům komory dochází vlivem zejména měřicí hlavičky laseru v průběhu měření k oteplení měřicího prostředí, a to zhruba o 0,012 °C za jednu minutu. Díky tomu dochází v průběhu měření ke změně indexu lomu a tím pádem i ke změně hodnoty integrace akustického tlaku. I pro nejdelší možné měření je však změna indexu lomu (a tím pádem i konstanty pro přepočtení naměřené rychlosti na akustický tlak) tak nepatrná, že nejsou na rekonstruovaných obrazcích pozorovatelné jakékoliv změny a vliv oteplení prostředí lze tedy zanedbat.

Na kvalitu naměřených, případně rekonstruovaných dat, má zásadní vliv zvolený krok translačního a rotačního motoru. Kroky musí být zvoleny tak, aby vzdálenost posuvu jednoho bodu vzhledem k měřicímu laseru neporušovala pro zvolenou frekvenci Shannon-Kotelnikovův teorém. Porušení tohoto pravidla je viditelné i na sinogramu naměřených dat, kdy nejsou mezi jednotlivými hodnotami plynulé přechody. Minimální možný krok motorů je 1 mm, resp. 1°, maximální měřitelná frekvence je tedy přibližně 48 kHz. Krok translačního motoru také ovlivňuje rozlišení rekonstruovaného obrazce, krok rotačního motoru při příliš velké hodnotě způsobuje na rekonstruovaných datech hvězdicový efekt a méně plynulé přechody mezi úrovněmi hodnot.

Měření bylo prováděno se třemi různými typy zdroje. Nejdříve byl proměřován akustický monopól. U něj rekonstruovaná data odpovídala předpokládaným výsledkům. Také se zde projevilo další omezení měřicího řetězce. Kvůli délce posuvu translačního motoru při proměření nízkých frekvencí a zdrojů s širokými úhly vyzařování mohou být rekonstruovány pouze části akustického pole v nejbližším okolí od zdroje a nelze získat komplexní přehled o rozložení akustického tlaku na větší ploše. Při použití dalších akustických zdrojů, tedy dipólu a laboratorního přípravku s devíti ultrazvukovými zdroji, již nebylo možné získat kvalitní rekonstrukci rozložení akustického tlaku. Data naměřená s dipólem byla ještě ověřena pomocí proměření s vysokofrekvenčním mikrofonom. Charakter naměřených dat pomocí LDV a pomocí mikrofону se shoduje, data získaná pomocí LDV však zdaleka nedosahují takové přesnosti a detailů. Pro měření provedené s laboratorním přípravkem byly na rekonstrukce nezřetelně viditelné pozice

jednotlivých mikrofónů, v datech se však vyskytovalo velmi silné rušení a značné rozdíly mezi sousedními hodnotami. I když tedy měřené frekvence nepřekročily maximální měřitelný kmitočet, pro složitější rozložení akustických tlaků by bylo třeba na manipulátoru použít jemnější krok pro oba motory.

Vliv šumu způsobeného měřicími přístroji byl tedy vyhodnocen jako nevýrazný, stejně tak vliv oteplení měřicí komory v průběhu měření je možné zanedbat. Výraznější je vliv mechanických vibrací okolního prostředí na frekvencích 23,5 kHz a 67,5 kHz, rušení na těchto kmitočtech v některých případech dokonce převyšuje měřené hodnoty. Vliv akustického pole na odrazné zrcátko nebylo možné pomocí provedeného experimentu dokázat a lze ho doporučit jako předmět dalšího zkoumání. Nejzásadnější vliv na naměřená data má zvolený krok motorů, který ovlivňuje schopnost provést úspěšnou rekonstrukci. Pro jednoduchý monopól byla naměřená data výrazná a odpovídala očekávaným výsledkům, při použití složitějších akustických zdrojů se ale projevil příliš velký minimální krok u obou motorů. Jako vylepšení v měřicím řetězci lze tedy pro budoucí výzkum doporučit úpravu programu tak, aby bylo možné zvolit menší krok.

8 ZÁVĚR

Práce se zabývala sestavením měřicího pracoviště určeného pro bezkontaktní měření vibrací pomocí systémů pro řízení polohování a sběr signálů od firmy National Instruments a laserového vibrometru Polytec. Dále byla vytvořena počítačová aplikace v programu LabVIEW, a nakonec bylo provedeno ověření funkčnosti celého měřicího systému a jeho parametrů při praktickém měření prostorového rozložení akustické tlaku.

Nejdříve byla provedena rešerše optických metod, které je možné pro bezkontaktní měření akustických polí možné využít. Z těchto metod byla jako nejvíce vyhovující kvůli své jednoduchosti na konstrukci a zpracování naměřených signálů vybrána metoda využívající laserový Dopplerův vibrometr. Další kapitola se zabývala teoretickým rozbořem tzv. akusto-optického jevu, při kterém dochází k ovlivňování optických vlastností prostředí pomocí akustického signálu, přičemž se kapitola zabývala i důkazem, že lze tento jev zvolenou bezkontaktní metodou měřit. Dále jsou v práci přiblíženy různé metody inverzní Radonovy transformace, což je matematický aparát sloužící k rekonstrukci obrazů z počítačové tomografie. Z uvedených metod byla pro implementaci nakonec vybrána pouze metoda Zpětné projekce, ostatní metody byly vzhledem ke své enormní výpočetní náročnosti a vysoké složitosti na implementaci označeny za nevhodné. Následně byl proveden návrh měřicího pracoviště a popis použitých zařízení určených jak pro polohování zdroje zvuku, tak pro záznam naměřených dat. Předposlední kapitola byla věnována popisu programu určeného pro ovládání zařízení, záznam, zpracování a analýzu naměřených dat. Poslední kapitola obsahovala analýzu funkčnosti vytvořeného algoritmu pro rekonstrukci naměřených dat a byly zde rozebrány aspekty které naměřená data ovlivňují.

Z použitých měřicích zařízení do naměřených charakteristik přidává nejvíce šumu dekodér Polytec OFV – 5000, a to přibližně 80 μ V. Dále jsou naměřené výsledky pravděpodobně ovlivňovány nedodržením doporučené vzdálenosti mezi odrazným zrcátkem a měřicí hlavicí. V kontextu všech vlivů ale byly tyto vlivy vyhodnoceny jako nevýrazné.

Výrazněji se v naměřených datech projevují vibrace způsobené okolním prostředím, pracoviště je zejména citlivé na vibrace přenášené na odrazné zrcátko. Podle očekávání se rušení objevuje na nízkých frekvencích do 1 kHz, zbylé amplitudy Fourierovy transformace naměřených charakteristik dosahují hodnot šumu způsobeného dekodérem. Jediné výjimky jsou frekvence 23,5 kHz a 67,5 kHz, na kterých je hodnota šumu dokonce nad úrovní měřených amplitud, v blízkém okolí těchto frekvencí tedy není akustické pole vhodné proměřovat.

Pro zjištění míry ovlivnění vibrací samotného zrcátka emitovaným akustickým polem byl proveden experiment, při kterém byla optická cesta laseru

částečně odstíněna od vlivu zdroje zvuku. Výsledky měření jsou však kvůli nemožnosti odstínit celou optickou trasu neprůkazné a experiment by případně bylo vhodné opakovat s jinou konfigurací přístrojů.

Z důvodů menších rozměrů bezodrazové komory byla provedena analýza změny teploty prostředí v průběhu měření. Nakonec bylo dosaženo závěru, že teplota prostředí se v průběhu času zvyšuje, vliv na naměřené hodnoty je ovšem minimální a lze ho úplně zanedbat.

Bylo dosaženo závěru, že největší vliv na kvalitu rekonstruovaných dat má zvolený krok motorů zajišťujících přesun zdroje zvuku, zejména na rozlišení rekonstrukce a přítomnost fragmentů v ní.

Jako zdroje akustických polí byly postupně použity tři přípravky – akustický monopól, dipól a laboratorní přípravek s devíti ultrazvukovými reproduktory. U monopólu odpovídala naměřená data očekávaným výsledkům. Z rozložení naměřených u dipólu a laboratorního přípravku rekonstruovaná data neměla dostatečnou kvalitu a přesnost. Byl tedy vyvozen závěr, že měřicí řetězec je vhodný pro měření jednoduchých akustických polí, při proměřování složitějších rozložení, ve kterých dochází k interferencím kvůli přítomnosti více zvukových zdrojů, je nutné umožnit měnit krok motorů po menších hodnotách.

Práce splnila zadání. Celé měřicí pracoviště bylo realizováno a bylo pro několik testovacích zdrojů zvuku měřeno prostorové rozložení akustického tlaku. Podle teoretických předpokladů je maximální měřitelná frekvence omezena na hodnotu přibližně 48 kHz, z prakticky dosažených výsledků však vychází, že pro složitější akustická pole obsahující interference z více zdrojů je tato hodnota nižší. V práci nebyl řádně prozkoumán vliv akustického pole na vibrace samotného odrazného zrcátka. V této oblasti by bylo vhodné provést ještě další měření, stejně tak by bylo vhodné zjistit vliv použití velmi malých kroků motorů u dipólu a laboratorního přípravku na rekonstruovaná data.

9 POUŽITÉ ZDROJE

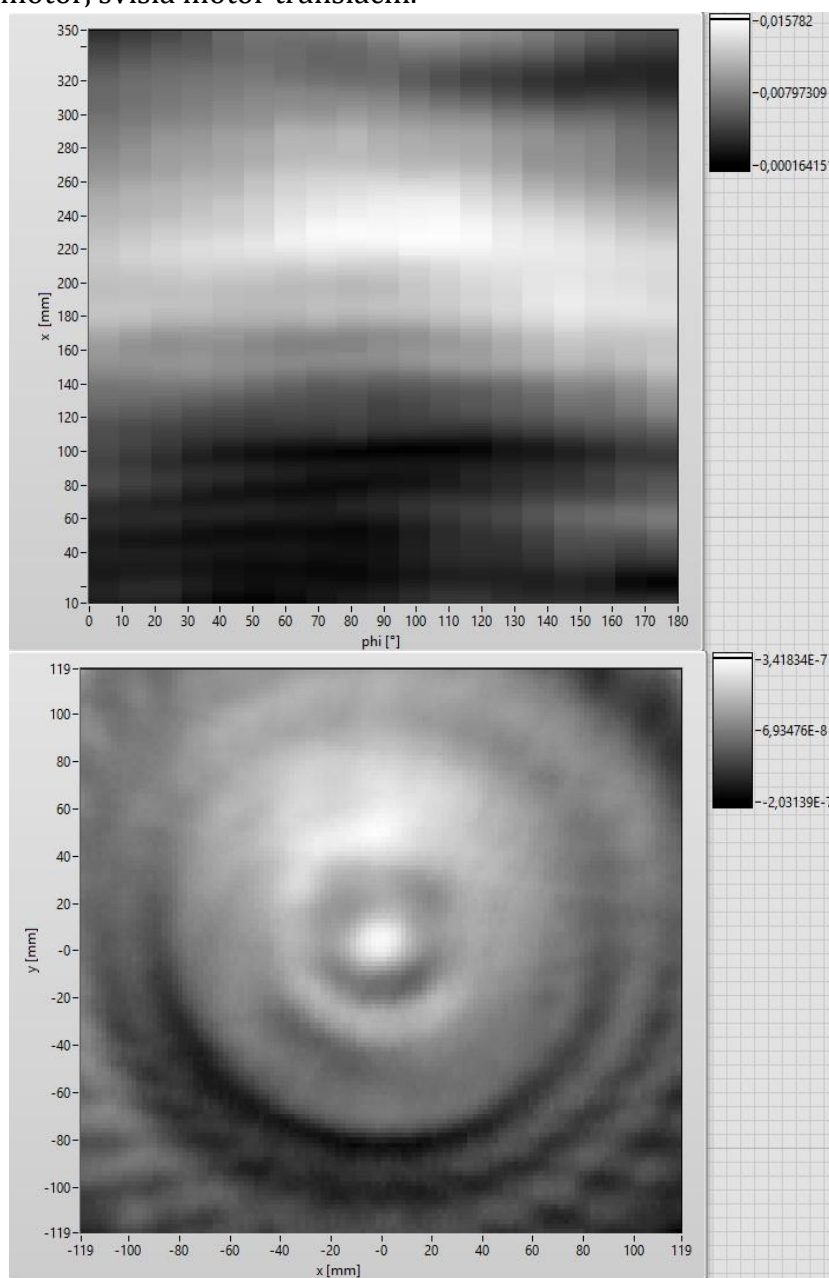
- [1] ROSELL, Antoni Torras. *New measurements techniques: Optical methods for characterizing sound fields*. Copenhagen, Denmark, 2014, 218 s. ISBN 978-87-92465-46-7. PhD thesis. Technical University of Denmark.
- [2] Schematic of Schlieren arrangement. In: *NPTEL* [online]. Chennai [cit. 2018-11-21]. Dostupné z: <https://nptel.ac.in/courses/112103021/module7/lec39/2.html>
- [3] A Wollaston prism. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2019 [cit. 2018-11-23]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Wollaston_prism
- [4] GOODMAN, Joseph W. *Speckle phenomena in optics: theory and applications*. Englewood, Colo., c2007. ISBN 09-747-0779-1.
- [5] DAINITY, J. C. *Laser speckle and related phenomena*. 2nd enl. ed. New York: Springer-Verlag, 1984. ISBN 03-871-3169-8.
- [6] Holographic Interferometry. *The University of Edinburgh* [online]. Edinburgh, c2019 [cit. 2018-11-29]. Dostupné z: <https://www2.ph.ed.ac.uk/~wjh/teaching/mo/slides/holo-interferometry/holo-inter.pdf>
- [7] WANG, M.L., J.P. LYNCH a H. SOHN. *Sensor technologies for civil infrastructures*. Amsterdam: Elsevier, Woodhead Publishing, [2014], s. 327-356. Woodhead Publishing series in electronic and optical materials, no, 55, 56. ISBN 978-0-85709-432-2.
- [8] KELLY, Anthony a Carl ZWEBEN. *Comprehensive composite materials*. New York: Elsevier, 2000, s. 447-468. ISBN 978-0-08-042993-9.
- [9] Laser Doppler vibrometry. In: *Polytec* [online]. c1967-2018 [cit. 2018-12-02]. Dostupné z: [https://www.polytec.com/us/vibrometry/basic-principles-of-vibrometry/\\$laser-doppler-vibrometry/\\$single-point-vibrometry/](https://www.polytec.com/us/vibrometry/basic-principles-of-vibrometry/$laser-doppler-vibrometry/$single-point-vibrometry/)
- [10] Experiment 4 - LASER DOPPLER ANEMOMETRY. VIRGINIA POLYTECHNIC INSTITUTE AND STATE UNIVERSITY. *Virginia Tech* [online]. [cit. 2018-12-05]. Dostupné z: <http://www.dept.aoe.vt.edu/~devenpor/aoe3054/manual/expt4/index.html>
- [11] Particle Image Velocimetry. In: *Velocimetry* [online]. c2008-2018 [cit. 2018-12-28]. Dostupné z: <https://www.velocimetry.net/principle.htm>
- [12] RADON, Johann a P. C. PARKS. On the Determination of Functions From Their Integral Values Along Certain Manifolds. *IEEE Transactions on medical imaging*. 1986, **1986**(4), 170-176.
- [13] ANASTASIO, M.A., X. PAN a E. CLARKSON. Comments on the filtered backprojection algorithm, range conditions, and the pseudoinverse solution. *IEEE Transactions on Medical Imaging* [online]. 2001, **20**(6), 539-542 [cit. 2018-11-28]. DOI: 10.1109/42.929620. ISSN 0278-0062. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/929620/>

- [14] CLACKDOYLE, Rolf a Michel DEFRISE. Tomographic Reconstruction in the 21st Century. *IEEE Signal Processing Magazine* [online]. 2010, **27**(4), 60-80 [cit. 2018-12-14]. DOI: 10.1109/MSP.2010.936743. ISSN 1053-5888. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5484190/>
- [15] KAK, Avinash C. a Malcolm SLANEY. *Principles of computerized tomographic imaging*. New York: IEEE Press, c1988. ISBN 08-794-2198-3.
- [16] SHAPIRO, V.A. A fast indirect backprojection algorithm. *Proceedings of 1st International Conference on Image Processing* [online]. IEEE Comput. Soc. Press, 1994, , 158-162 [cit. 2018-11-20]. DOI: 10.1109/ICIP.1994.413551. ISBN 0-8186-6952-7. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/413551/>
- [17] JÁGR, Filip. *Numerické metody tomografie pro nehomogenní optické materiály* [online]. Liberec, 2018 [cit. 2018-12-8]. Dostupné z: https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/32265/DP_Jagr.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Prof. Ing. Pavel Mokřý, Ph.D.
- [18] Radon transform. In: *Scikit-image: Image processing in Python* [online]. [cit. 2018-12-16]. Dostupné z: http://scikit-image.org/docs/dev/auto_examples/transform/plot_radon_transform.html#id2
- [19] PRASATH, S., M. MARIESWARAN a G. MURUGABOOPATHI. Reconstruction of Parallel and Fan Beam Projections for Biomedical Diagnosis. *Journal of Medical and Bioengineering* [online]. 2016, **2016**(2), 119-123 [cit. 2018-12-18]. DOI: 10.18178. Dostupné z: <http://www.jomb.org/uploadfile/2015/0929/20150929032418558.pdf>
- [20] KARÁSEK, D. Mechanický manipulátor řízený z platformy cRIO. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 52 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdeněk Havránek, Ph.D..
- [21] PXI-4461: PXI Sound and Vibration Module. *National Instruments* [online]. [cit. 2018-12-20]. Dostupné z: <http://www.ni.com/cs-cz/support/model.pxi-4461.html>
- [22] *K-Wave* [online]. c2010-2017 [cit. 2018-12-22]. Dostupné z: <http://k-wave.org/>
- [23] PAVLOŇ, M. Analýza dynamických parametrů laserových vibrometrů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 88 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Zdeněk Havránek, Ph.D.
- [24] HORVÁTH, Pavel a Petr ŠMÍD. *Koherenční zrnitost a její vybrané aplikace*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2012. ISBN 978-80-244-3112-3.
- [25] Measurement principles of LDA. *Dyntec Dynamics* [online]. [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <https://www.dantecdynamics.com/measurement-principles-of-lda>
- [26] ALBRECHT, H.-E., M. BORYS, N. DAMASCHKE a C. TROPEA. *Laser Doppler and Phase Doppler Measurement Techniques*. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003. ISBN 978-3-642-08739-4.

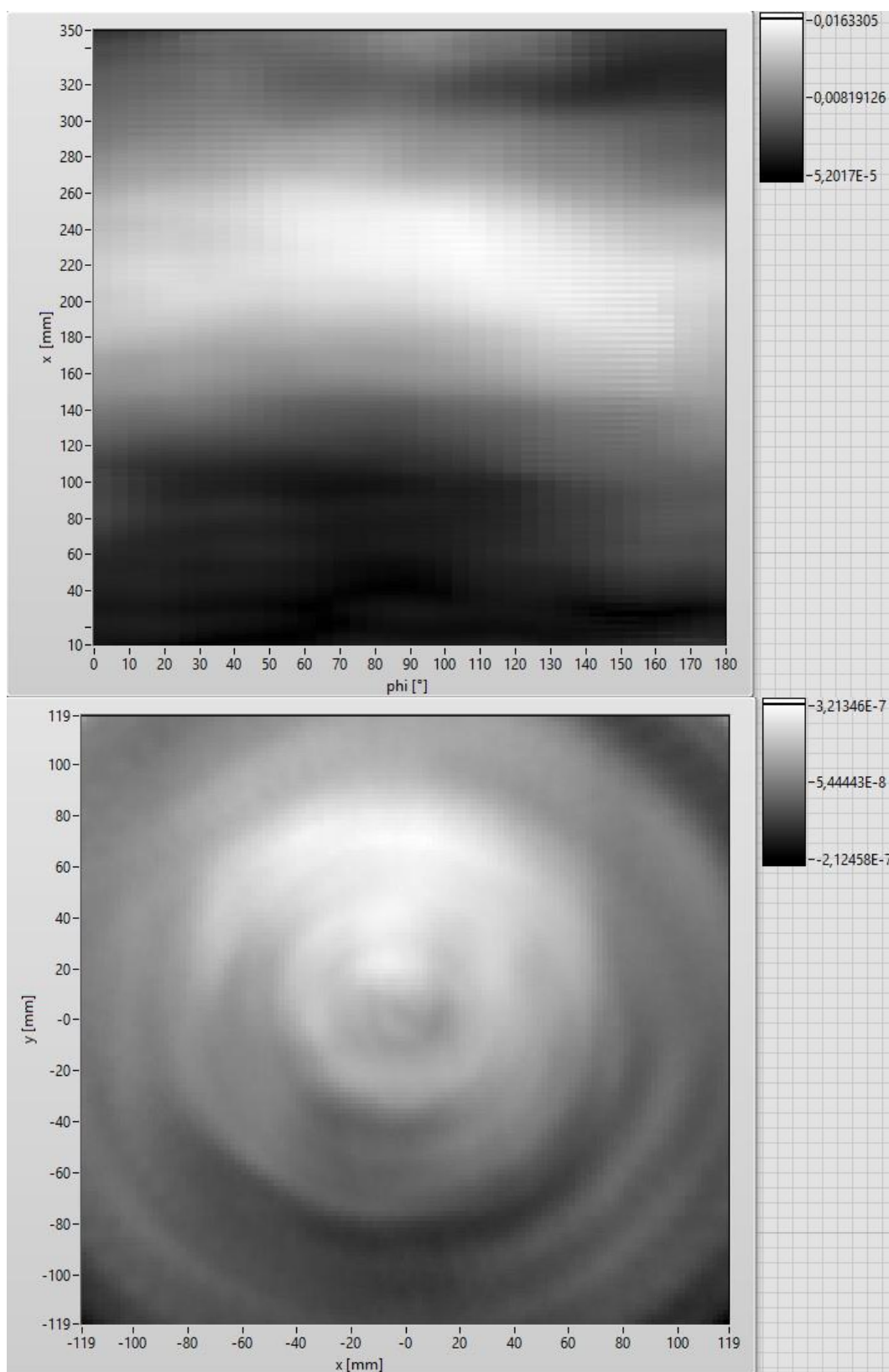
- [27] TORRAS-ROSELL, Antoni, Salvador BARRERA-FIGUEROA a Finn JACOBSEN. Sound field reconstruction using acousto-optic tomography. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2012, **131**(5), 3786-3793. DOI: 10.1121/1.3695394. ISSN 0001-4966. Dostupné také z: <http://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.3695394>
- [28] VAN HEMELRYCK, Tessa, Sarah WUYTS, Maggie GOOSSENS, Kees Joost BATENBURG a Jan SIJBERS. *The implementation of iterative reconstruction algorithms in MATLAB*. Belgium, 2007. Masters Thesis. University College of Antwerp.
- [29] XUEMEI, Chen. Kaczmarz Algorithm, row action methods, and statistical learning algorithms. San Francisco. University of San Francisco.
- [30] The Kaczmarz method for solving linear systems of equations. *R196, Hilbert's Hotel* [online]. 2013 [cit. 2019-04-27]. Dostupné z: <https://inlieuofabetterttitle.wordpress.com/2013/02/02/the-kaczmarz-method-for-solving-linear-systems-of-equations/>
- [31] ROELANDTS, Tom. The SIRT Algorithm. *TomRoelandts.com* [online]. 22.6.2014 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://tomroelandts.com/articles/the-sirt-algorithm>
- [32] MING JIANG a GE WANG. Convergence of the simultaneous algebraic reconstruction technique (SART). *IEEE Transactions on Image Processing*. 2003, **12**(8), 957-961. DOI: 10.1109/TIP.2003.815295. ISSN 1057-7149. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1217272/>
- [33] BEATTY, Jen. *The Radon Transform and the Mathematics of Medical Imaging*. Mathematics and Statistics Dept., 2017. Honors Thesis. Colby College. Vedoucí práce Alan Von Herrmann.
- [34] Refractive index of air in dependence of temperature. *Physics Stack Exchange* [online]. [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: <https://physics.stackexchange.com/questions/6872/refractive-index-of-air-in-dependence-of-temperature>
- [35] *OFV-505 Sensor Head: Datasheet* [online]. [cit. 2019-03-8]. Dostupné z: https://www.polytec.com/fileadmin/d/Vibrometrie/OM_DS_OFV-505_E_42347.pdf
- [36] *OFV-5000 Vibrometer Controller: Datasheet* [online]. [cit. 2019-03-8]. Dostupné z: https://www.polytec.com/fileadmin/d/Vibrometrie/OM_DS_OFV-5000_E_42346.pdf
- [37] OFV-50x Vibrometer Sensor Head. *Hysen Corp* [online]. [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: http://www.hysen.com/product/view.php?idx=3&no=3&cat_no=&offset=
- [38] POLYANSKIY, Mikhail N. *RefractiveIndex.info* [online]. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <https://refractiveindex.info/>

10 PŘÍLOHA A – NAMĚŘENÁ ROZLOŽENÍ AKUSTICKÝCH POLÍ

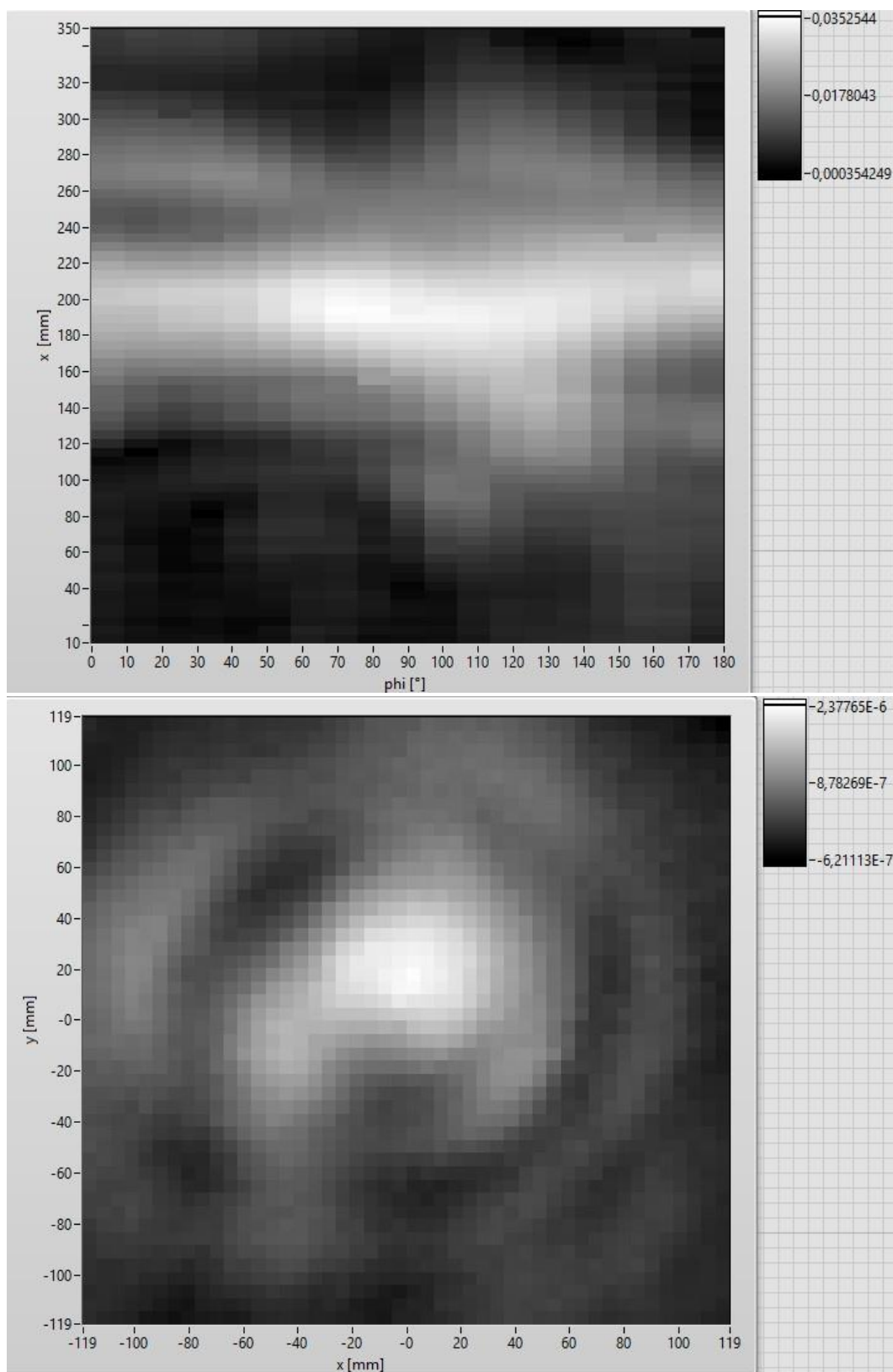
Horní graf intenzity vždy představuje přímo naměřená data, hodnoty jsou v přímo extrahovaných amplitudách napětí ve V. Spodní graf intenzity představuje data rekonstruovaná, hodnoty jsou zobrazeny v naměřených rychlostech, tedy v m/s. Měřená frekvence a kroky motorů jsou vždy uvedeny v popisku obrázku, rozsahy motorů jsou viditelné na osách grafů naměřených dat – vodorovná osa představuje rotační motor, svislá motor translační.



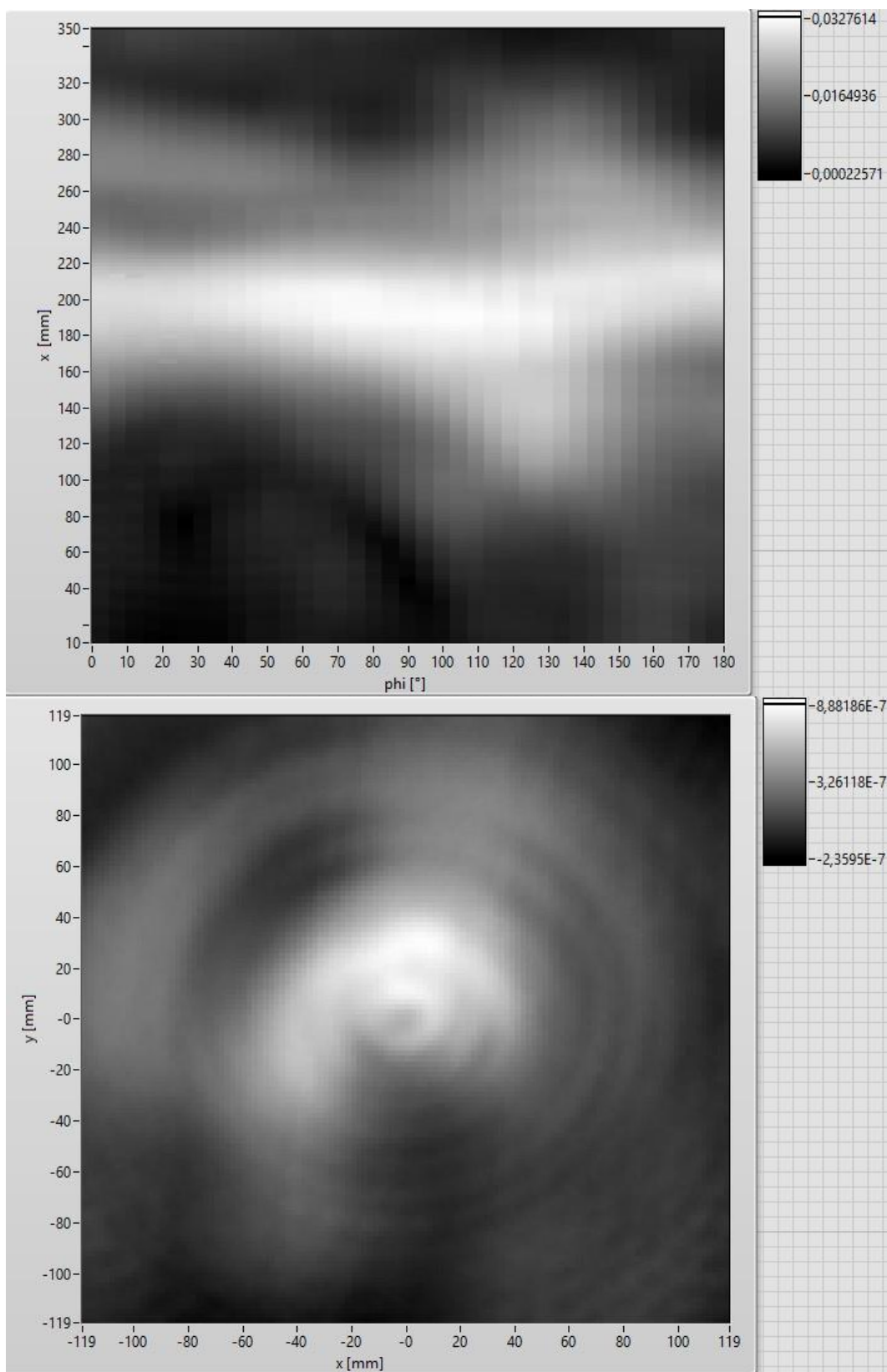
Obr A. 1 Monopól, $f=10$ kHz, krok rotace 10° , krok translace 2 mm



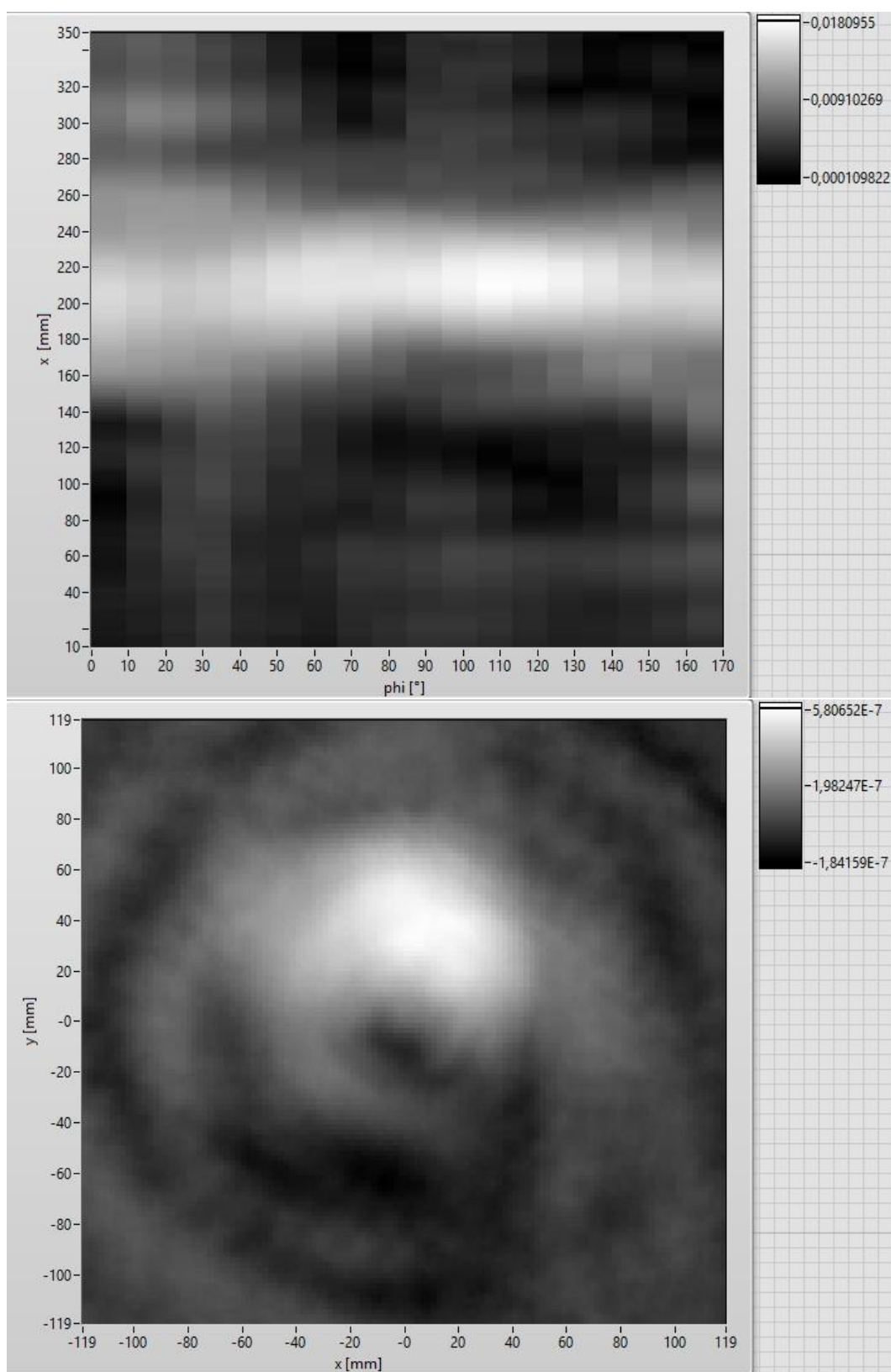
Obr A. 2 Monopól, $f=10$ kHz, krok rotace 5°, krok translace 2 mm



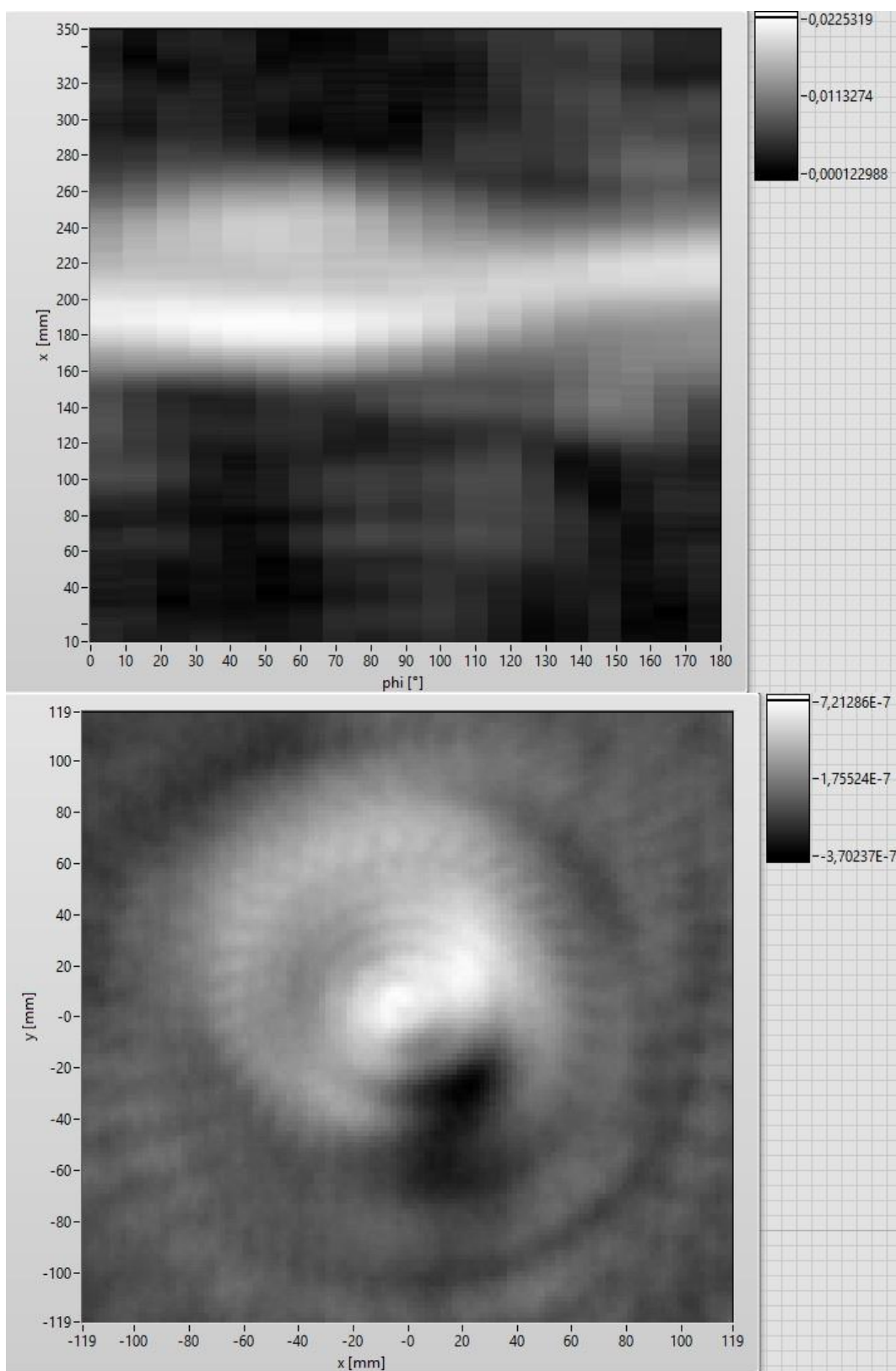
Obr A. 3 Monopól, $f=20$ kHz, krok rotace 10° , krok translace 5 mm



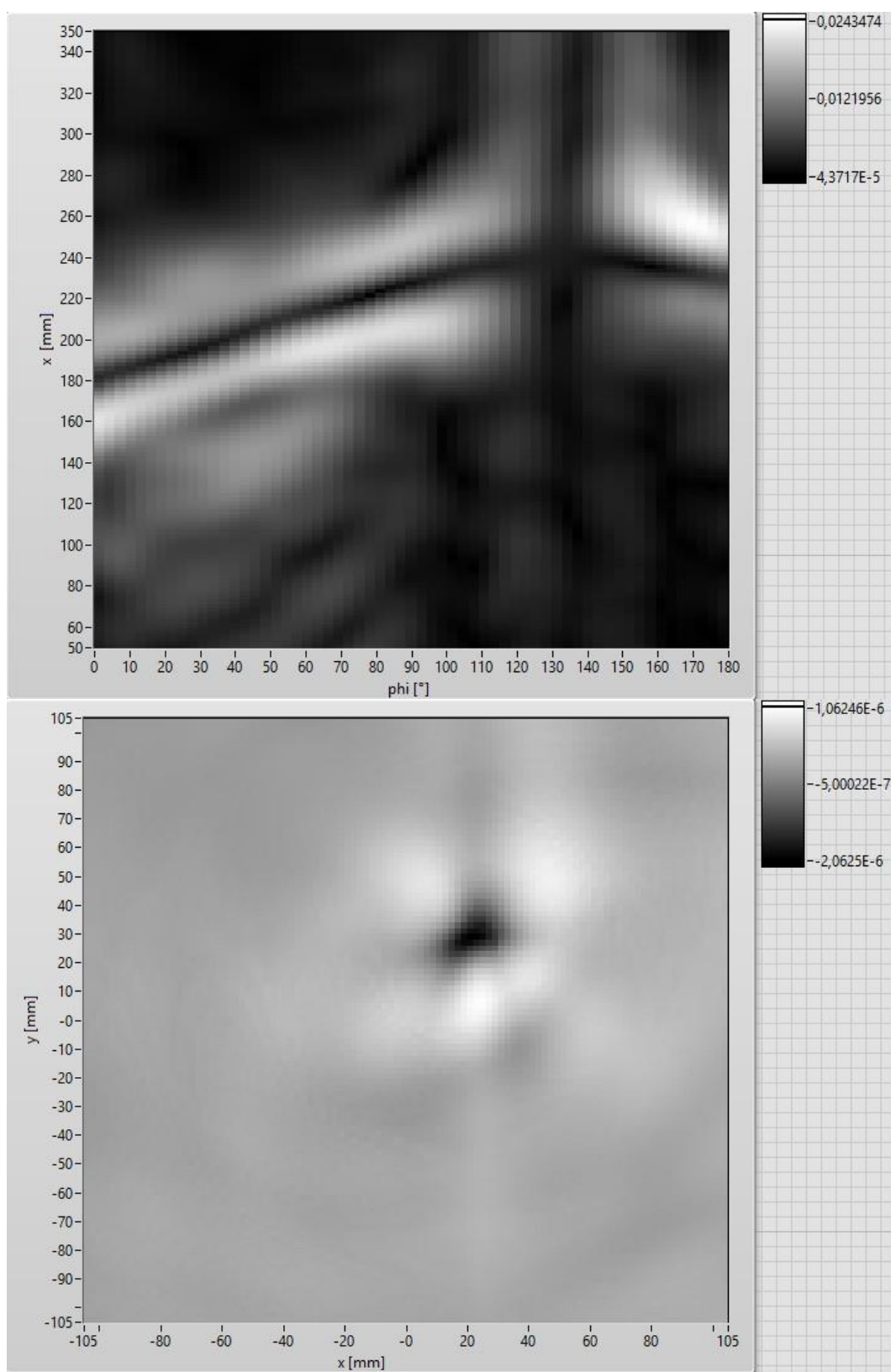
Obr A. 4 Monopól, $f=20$ kHz, krok rotace 5°, krok translace 2 mm



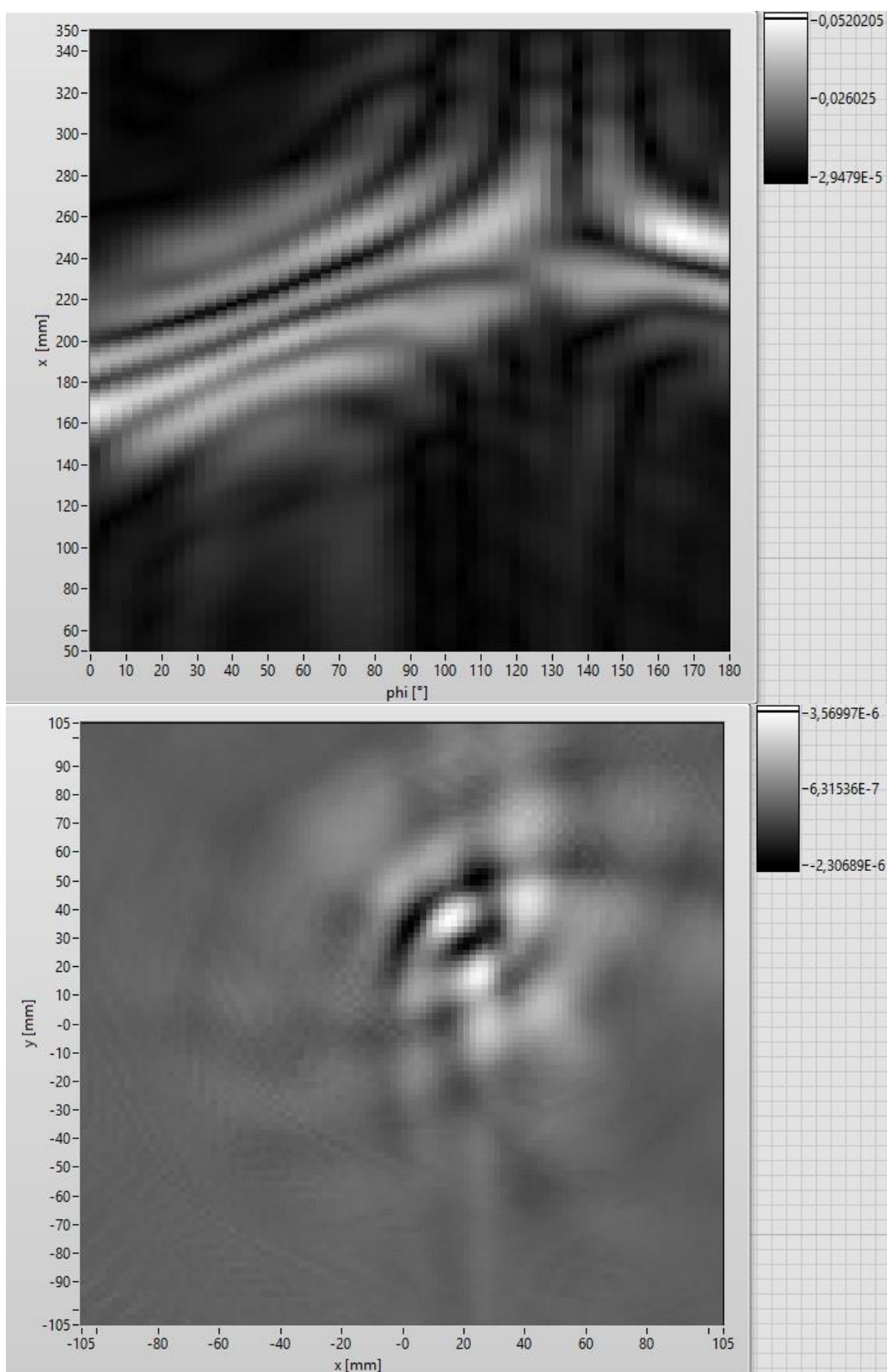
Obr A. 5 Monopól, $f=20$ kHz, krok rotace 10° , krok translace 2 mm



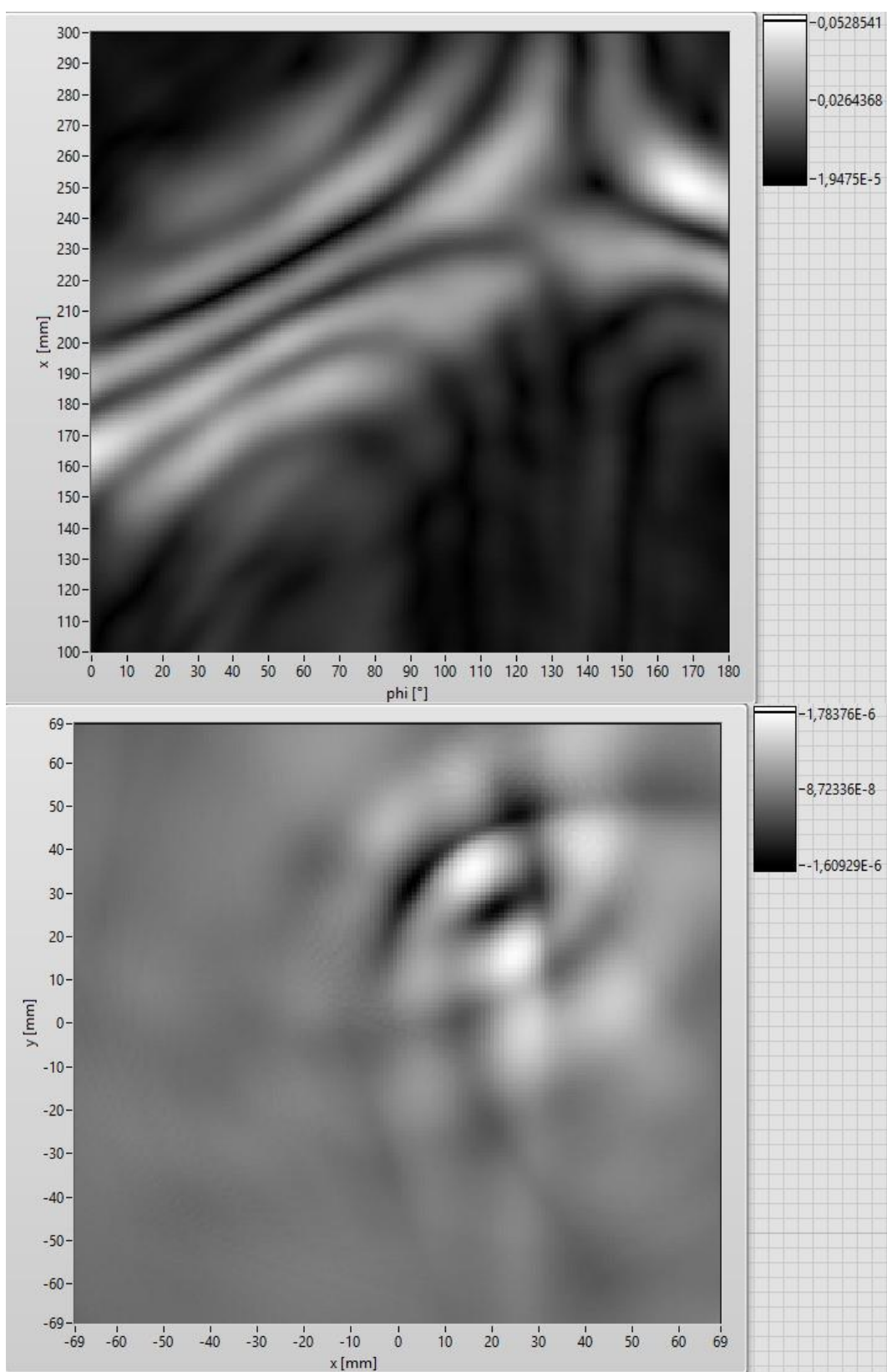
Obr A. 6 Monopól, $f=40$ kHz, krok rotace 10° , krok translace 2 mm



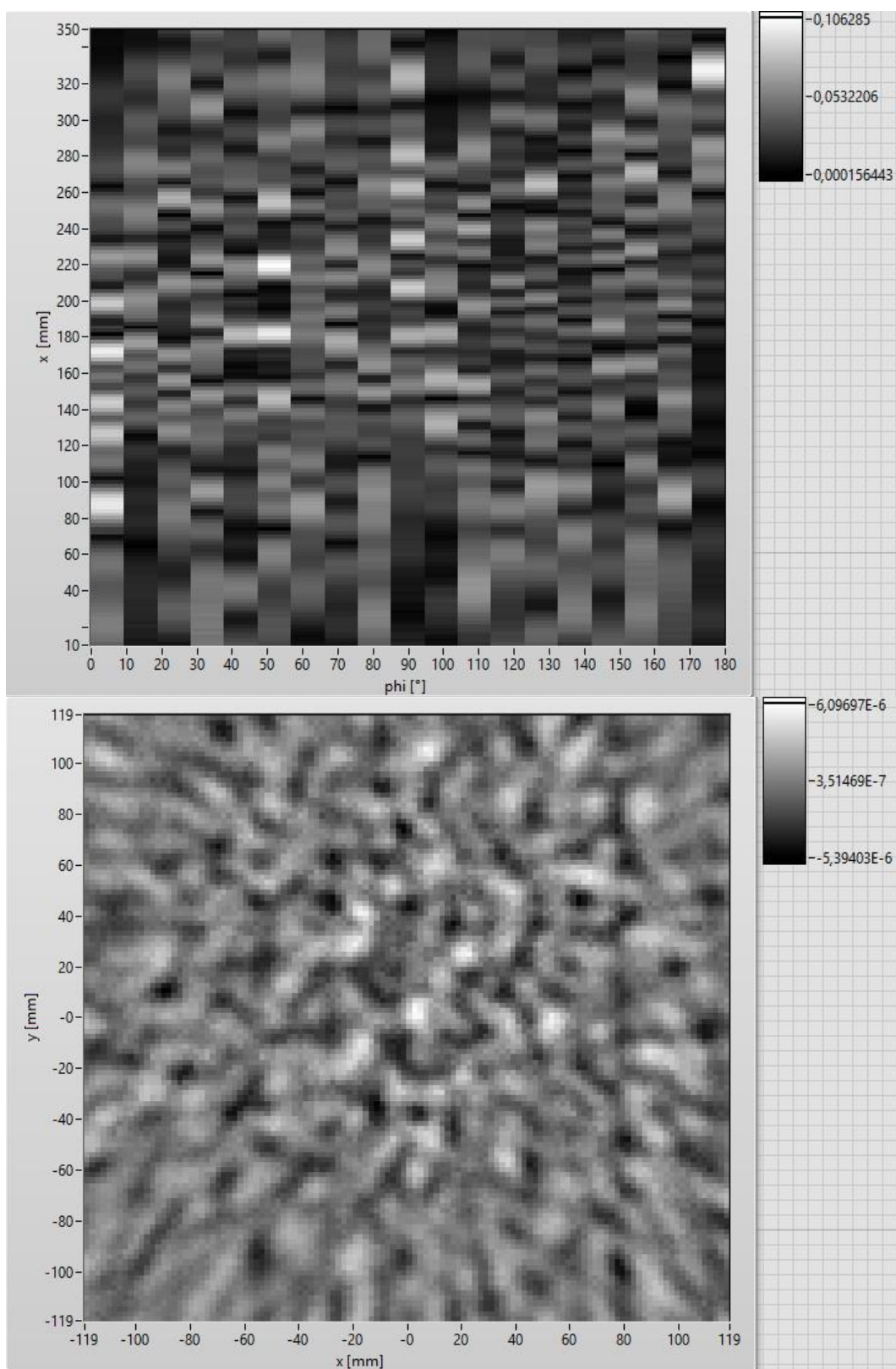
Obr A. 7 Dipól, $f=10$ kHz, krok rotace 3° , krok translace 2 mm



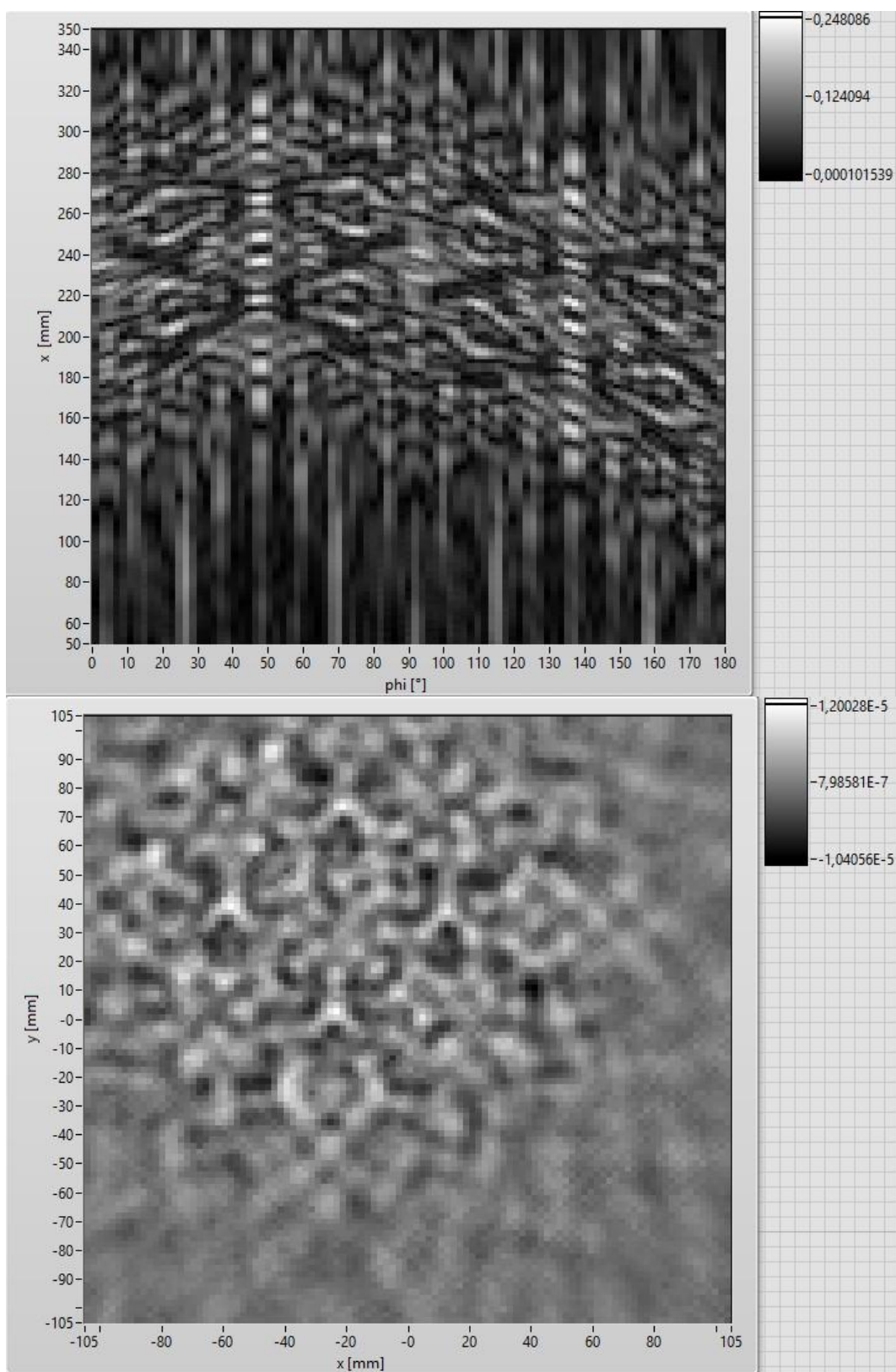
Obr A. 8 Dipól, $f=20$ kHz, krok rotace 3° , krok translace 2 mm



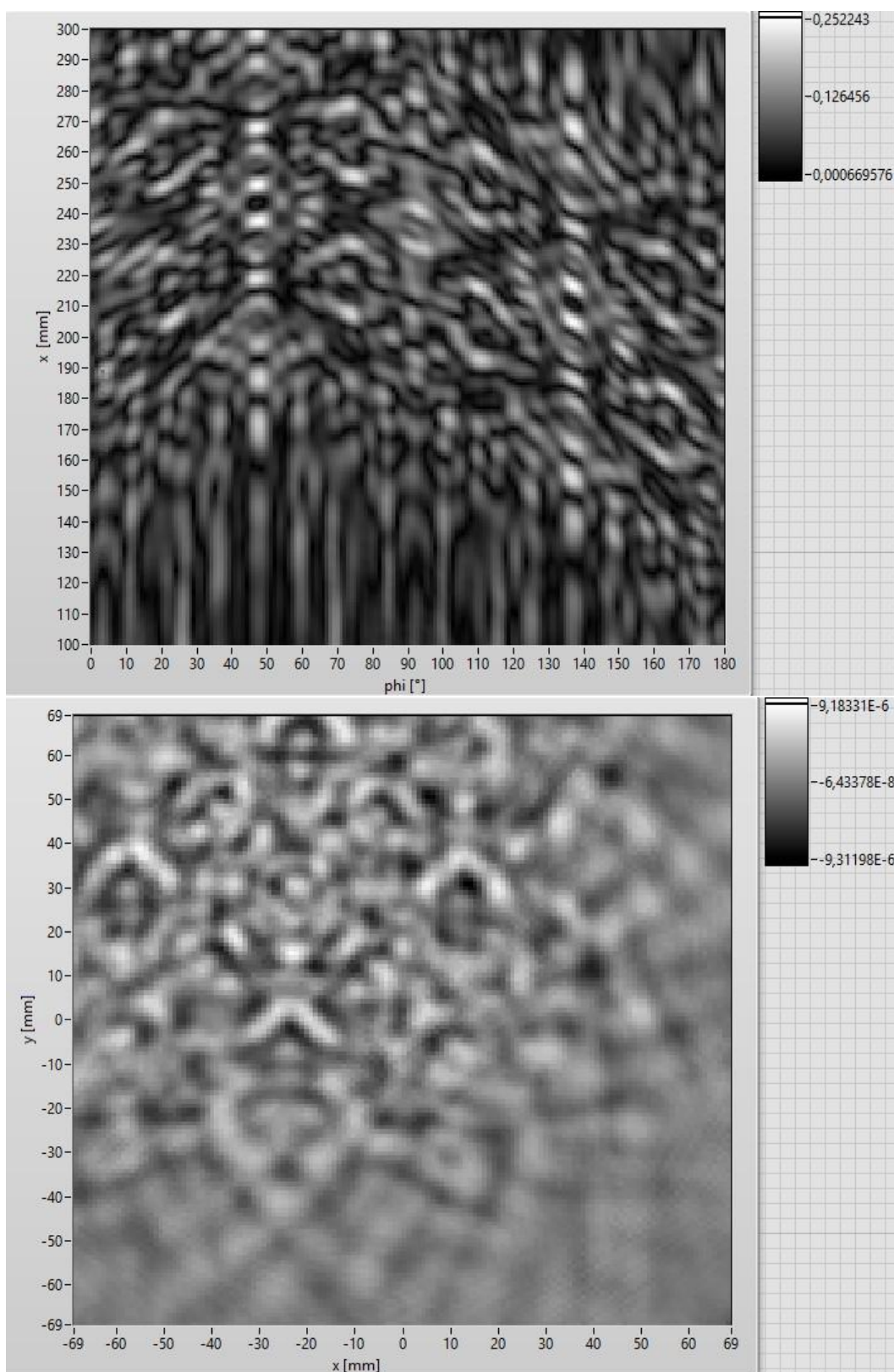
Obr A. 9 Dipól, $f=20$ kHz, krok rotace 1° , krok translace 1 mm



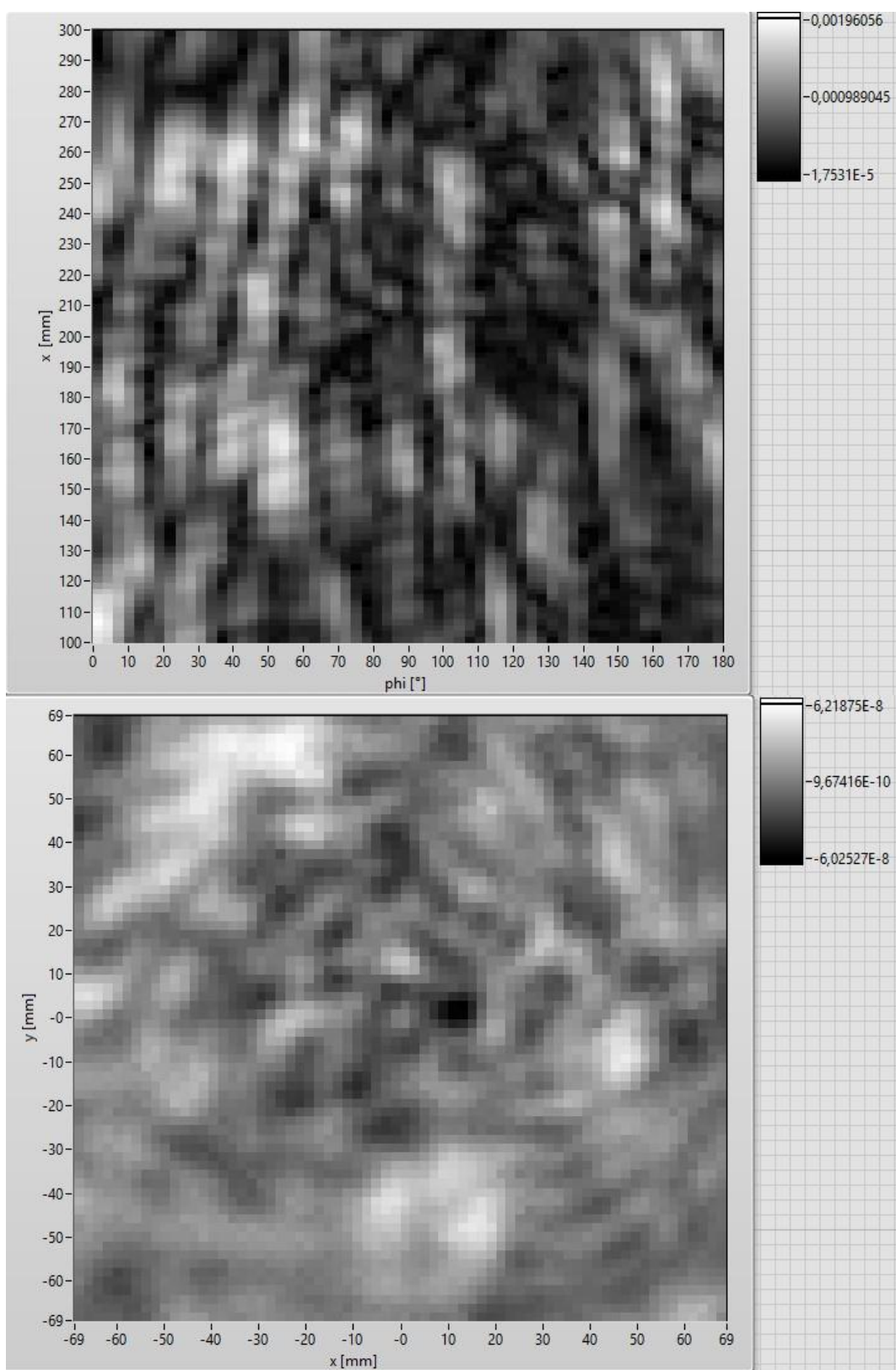
Obr. A. 10 Lab. přípravek, $f=40$ kHz, krok rotace 10° , krok translace 2 mm



Obr A. 11 Lab. přípravek, $f=40$ kHz, krok rotace 2° , krok translace 2 mm



Obr A. 12 Lab. přípravek, $f=40$ kHz, krok rotace 1° , krok translace 1 mm



Obr. A. 13 Pokus o potlačení pole pomocí trubičky, dipól, $f=20$ kHz, krok rotace 3° ,
krok translace 2 mm